

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/004837

International filing date: 17 March 2005 (17.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP  
Number: 2004-081396  
Filing date: 19 March 2004 (19.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 09 June 2005 (09.06.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日  
Date of Application: 2 0 0 4 年 3 月 1 9 日

出 願 番 号  
Application Number: 特 願 2 0 0 4 - 0 8 1 3 9 6

パリ条約による外国への出願  
に用いる優先権の主張の基礎  
となる出願の国コードと出願  
番号

The country code and number  
of your priority application,  
to be used for filing abroad  
under the Paris Convention, is

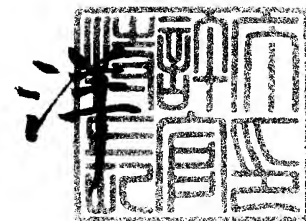
J P 2 0 0 4 - 0 8 1 3 9 6

出 願 人  
Applicant(s): 古河電気工業株式会社

2 0 0 5 年 5 月 2 5 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小 川



【書類名】	特許願
【整理番号】	P0403043
【あて先】	特許庁長官殿
【国際特許分類】	G02F 1/35
【発明者】	
【住所又は居所】	東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内
【氏名】	井上 崇
【発明者】	
【住所又は居所】	東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内
【氏名】	並木 周
【特許出願人】	
【識別番号】	000005290
【氏名又は名称】	古河電気工業株式会社
【代理人】	
【識別番号】	100101764
【弁理士】	
【氏名又は名称】	川和 高穂
【手数料の表示】	
【予納台帳番号】	034522
【納付金額】	21,000円
【提出物件の目録】	
【物件名】	特許請求の範囲 1
【物件名】	明細書 1
【物件名】	図面 1
【物件名】	要約書 1
【包括委任状番号】	9805685

【書類名】 特許請求の範囲

【請求項 1】

非線形媒質と分散媒質とが連結された第 1 の光伝搬路ユニットを備えた光パルス成形器の設計方法であって、

前記第 1 の光伝搬路ユニットの設計仕様を特定するステップと、

前記特定した設計仕様に基づいて、前記第 1 の光伝搬路ユニットに対する入力光パルス及び出力光パルスの各波形が互いに相似となる準周期定常解を算出するステップと

を含むことを特徴とする光パルス成形器の設計方法。

【請求項 2】

前記第 1 の光伝搬路ユニットの後段に第 2 番目以降の光伝搬路ユニットが一又は複数直列に連結されて成ることを特徴とする請求項 1 に記載の光パルス成形器の設計方法。

【請求項 3】

前記算出した準周期定常解に基づいて、前記第 2 番目以降の光伝送路ユニットの設計仕様を特定するステップを更に含むことを特徴とする請求項 2 に記載の光パルス成形器の設計方法。

【請求項 4】

前記設計仕様は、少なくとも、前記各光伝搬路ユニットの非線形媒質及び分散媒質の各々が有する非線形係数、分散値及び光伝搬方向の長さ、と、前記入力光パルスのパワーピークとを含むことを特徴とする請求項 1 ～ 3 のうち何れか一項に記載の光パルス成形器の設計方法。

【請求項 5】

前記第 1 の光伝搬路ユニットの設計仕様に含まれる非線形媒質、分散媒質の各一般化分散値を  $s_1$ 、 $s_2$  とし、当該非線形媒質、分散媒質が各々有する各光伝搬方向の規格化長さを  $K_1$ 、 $L_1$  とすると、 $s_2$  は異常分散に属する値であると共に下記条件式を満たし、且つ、 $K_1$ 、 $L_1$  の各値は下記条件式を満たすことを特徴とする請求項 4 に記載の光パルス成形器の設計方法。

$$0 \leq |s_1| < 1 < s_2$$

$$L_1 < K_1$$

$$|s_1|; s_1 \text{ の絶対値}$$

【請求項 6】

前記複数の光伝搬路ユニットのうち前記第 1 の光伝搬ユニットから数えて第  $n$  番目 ( $n$  は 2 以上の自然数) に連結された光伝搬路ユニットの設計仕様に含まれる非線形媒質、分散媒質の各一般化分散値を  $s_{1n}$ 、 $s_{2n}$  とし、当該非線形媒質、分散媒質が各々有する各光伝搬方向の長さを  $K_n$ 、 $L_n$  とすると、 $s_{2n}$  は異常分散に属する値であると共に下記条件式を満たし、且つ、 $L_n$ 、 $K_n$  の各値は下記条件式を満たすことを特徴とする請求項 5 に記載の光パルス成形器の設計方法。

$$s_{1n} = s_1 / \alpha^{n-1}$$

$$s_{2n} = s_2 / \alpha^{n-1}$$

$$K_n = K_1 / \alpha^{n-1}$$

$$L_n = L_1 / \alpha^{n-1}$$

$$\alpha; \text{圧縮率}$$

【請求項 7】

前記複数の光伝搬路ユニットのうち前記第 1 の光伝搬ユニットから数えて第  $n$  番目 ( $n$  は 2 以上の自然数) に連結された光伝搬路ユニットの設計仕様に含まれる非線形媒質、分散媒質の各一般化分散値を  $s_{1n}$ 、 $s_{2n}$  とし、当該非線形媒質、分散媒質が各々有する各光伝搬方向の長さを  $K_n$ 、 $L_n$  とすると、 $s_{2n}$  は異常分散に属する値であると共に下記条件式を満たし、且つ、 $L_n$ 、 $K_n$  の各値は下記条件式を満たすことを特徴とする請求項 5 に記載の光パルス成形器の設計方法。

$$s_{1n} = s_1 / \alpha^{n-1}$$

$$s_{2n} = s_2$$

$$K_n = K_1 / \alpha^{n-1}$$

$$L_n = L_1 / \alpha^{2(n-1)}$$

$\alpha$  ; 圧縮率

【請求項 8】

前記入力光パルスは、準周期定常解に近い波形を有する光パルスであることを特徴とする請求項 1～7 のうち何れか一項に記載の光パルス成形器の設計方法。

【請求項 9】

前記非線形媒質に係る非線形係数、損失係数を、それぞれ  $\nu$ 、 $\delta$  とすると、該非線形媒質は、 $\nu$ 、 $\delta$  が下記条件式を満たす高非線形媒質であることを特徴とする請求項 1～8 のうち何れか一項に記載の光パルス成形器の設計方法。

$$z = - (1 / 2 \delta) \ln (1 - (2 \delta / a_0^2 \nu) \xi)$$

$z$  ; 光パルス成形器内における非線形媒質の光伝搬路方向の長さの総計を実距離で表現したもの

$\xi$  ; 光パルス成形器内における非線形媒質の光伝搬路方向の長さの総計を無次元量の規格化距離で表現したもの

$a_0$  ; 非線形媒質が有する光パルスの入力端のパワー減衰係数

$\ln$  ; 自然対数

【請求項 10】

前記非線形媒質に高非線形光ファイバを用い、前記分散媒質にシングルモード光ファイバを用いることを特徴とする請求項 1～9 のうち何れか一項に記載の光パルス成形器の設計方法。

【請求項 11】

請求項 1～10 のうち何れか一項に記載の設計方法に基づいて設計されたことを特徴とする光パルス成形器。

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光パルス成形器の設計方法及び光パルス成形器

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバ通信システムに用いられる光パルス発生技術に適用される、或いは材料加工用途に用いられる光パルス発生技術に適用される光パルス成形器と該光パルス成形器の設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、超短光パルスを生成して出力するための光パルス成形器の重要性が、光通信分野や光加工分野で急激に高まっている。

【0003】

光通信分野に関しては、1チャンネルあたりのビットレートが40Gb/sを超えるシステムでは、繰り返し周波数が十分大きいと、雑音や揺らぎ等がより少ない高品質な光パルスが要求される。また、光伝搬路中に挿入される中継器に対しては、伝搬中に生じる光パルスの波形劣化の回復を図るための光信号再生機能に局所クロックパルス列を発生させる必要がある。すなわち、40GHzを超える大きな繰り返し周波数のもとで、繰り返し特性や光パルスの波形品質が高く、しかもこの波形幅が非常に短い超短光パルス列が必要となる。

【0004】

一方、光加工分野に関しては、光パルスの波形幅がフェムト秒オーダーの光パルスを用いた多光子吸収過程を応用することにより、従来では得られなかった加工方法の実現が期待されている。

【0005】

また、従来の超短パルス発生技術は、共振器構造を用いるものと、共振器構造を用いないものと大きく分けることができる。

【0006】

共振器構造を用いる超短パルス発生技術には、チタンサファイアレーザ等の固体レーザ、光ファイバ自体によって共振器構造を構成するモード同期ファイバレーザ又は半導体を用いてモード同期構造を構成する半導体モード同期レーザ等が用いられている。

【0007】

一方、共振器構造を用いない超短パルス発生技術は、種信号となる光パルスが光ファイバ中の非線形効果により圧縮される現象を用いるものであり、共振器構造を用いないことからトラベリングウェーブ(TW)方式とも呼ばれ、光ソリトン圧縮器やスーパーコンティニューム(SC)圧縮器等が知られている。

【0008】

共振器構造を用いる超短パルス発生技術は、繰り返し周波数が共振器長で決定されるため、繰り返し周波数に対する柔軟性が少ない。更にパルス発振を継続させるためには、様々な安定化技術が必要な上に、外部環境の変化に応じて設定を微調整する必要があるという難点に伴う。

【0009】

これに対し、共振器構造を用いない超短パルス発生技術(特に、光ファイバを用いたTW方式に基づく超短パルス発生技術)では、電気回路により生成される光パルスやビート光等の種信号の波形幅を圧縮するため、繰り返し周波数が可変である。また、共振器構造を用いないことから、光ファイバ自体の安定性に応じた極めて高い安定性を有する光パルスの出力が可能となる。

【0010】

ここで、TW方式による光パルスの波形幅の圧縮は、SC圧縮や光ソリトン圧縮が知られている。

【0011】

SC圧縮は、光パルスの周波数帯域を、分散値の小さな光ファイバの非線形効果によっ

て大きく拡張させ、更に、この拡張された周波数帯域を分散補償することにより光パルスの波形幅を圧縮する。このSC圧縮を効率良く行うためには、光ファイバの分散値が、周波数に対し平坦であると共にファイバ長手方向に変化しないのが好ましい。

#### 【0012】

しかし、SC圧縮は、大きな圧縮率が得られるものの、圧縮された光パルスの波形にペデスタル成分が伴う等、パルス品質の低下を招く恐れが生じる等の困難が知られている。

#### 【0013】

一方、光ソリトン圧縮により生成される光ソリトンは、光ファイバの分散効果と非線形効果とが釣り合うことにより形成され、伝搬中に波形を変えない光パルスである。

#### 【0014】

光ソリトンの場合、ソリトン周期と呼ばれる距離に対し十分長いスパンで光ファイバの分散値を小さくする等して、分散効果をファイバ長手方向に緩やかに小さくしていくと、この弱まった分散効果を補償するようにパルス波形が自己整形され、結果的に光パルスの波形幅が小さくなる。或いは、光ファイバの分散値を一定に保ったまま後方励起ラマン増幅による分布増幅等を行うことにより光パルスの振幅をファイバ長手方向に緩やかに大きくしていくと非線形効果が強められ、この強められた非線形効果を補償するようにパルス波形が自己整形され、結果的に光パルスの波形幅が小さくなる。このような現象（光ファイバの分散効果と非線形効果とが釣り合う現象）を用いた圧縮方法は、断熱ソリトン圧縮と呼ばれ、sech関数型の光ソリトンとしての光パルスが得られることが知られている。

#### 【0015】

断熱ソリトン圧縮は、sech関数型の波形、つまりペデスタルを有さない高品質な光パルス波形を常に生成できるため、通信用途に適している。

#### 【0016】

また、ペデスタルを有する光パルスと、ペデスタルを有さない光パルスとを比較すると、両者が同一のエネルギー及び電力半値幅を持つような場合には、ペデスタルを有さない光パルスの方が大きなピークパワーを持つ。このため、ペデスタルを有さない光パルスは、材料加工用途に適している。

#### 【0017】

ところで、断熱ソリトン圧縮を行う方法としては、前述したように光ファイバの分散値をファイバ長手方向に緩やかに変化させる方法が知られている。この場合、分散値がファイバ長手方向に連続的に減少するような光ファイバの製造は容易ではないため、幾つかの代替方法が考案されている。

#### 【0018】

例えば、光ファイバの分散値をファイバ長手方向に広がる幾つかの区間に分け、当該区間毎に該当する一定の分散値を持つ光ファイバを連結させることにより、当該減少する分散値を近似するという方法が考案されている。この方法により構成された光ファイバは、Step-like Dispersion Profiled Fiber (SDPF) と称される。この方法では、ステップ数を多くするほど近似の精度が高くなる反面、様々な分散値のファイバを数多く用意する必要が生じる。

#### 【0019】

また、他の方法としては、光ファイバの分散値を、ファイバ長手方向に広がる幾つかの区間に分け、当該各区間を二種類の分散値を持つ光ファイバを用いて近似するという方法が考案されている。この方法により構成された光ファイバは、分散値がファイバ長手方向に櫛状に変化することからComb-like Dispersion Profiled Fiber (CDPF) と称される（非特許文献1、2、特許文献1、2を参照）。

【非特許文献1】 S.V.Chernikov et al.、 “Integrated all optical fibre source of multigigahertz soliton pulse train”、 Electronics Letters、 1993年、 vol.1. 29、 p.1788

【非特許文献2】 S.V.Chernikov et al.、 “Comblike dispersion-profiled fiber f

【特許文献1】特開2000-347228号公報

【特許文献2】特開2002-229080号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0020】

しかし、上記従来技術には、次のような問題点がある。

従来の超短光パルス発生技術に基づく光パルス成形器の設計では、ソリトン圧縮を行うための光ファイバの長さをどの程度に設定すればよいかが判定困難である。このため、現状では、試行錯誤により、光ファイバの長さの設定を行っている。

また、従来より、光パルスに対し非線形効果を生じさせるための光ファイバの分散値はゼロ又はゼロに近ければよいとされているが、このゼロでない分散値の大きさによって、光パルスの波形に劣化（歪み）が生じ得る。このため、高品質な光パルスの出力が困難である。

また、従来の断熱ソリトン圧縮では、光パルスの波形に劣化（歪み）は生じないが、大きな圧縮率を得るのが困難である。このため、ペデスタル等が生じても高い圧縮率を得ようとする場合には不向きである。

本発明の課題は、出力される光パルスの波形に劣化によるノイズを生じさせることなく、所望の波形幅の光パルスが容易に得られる設計容易な光パルス成形器とその設計方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0021】

上記課題を解決するため、請求項1に記載の発明は、非線形媒質と分散媒質とが連結された第1の光伝搬路ユニットを備えた光パルス成形器の設計方法であって、

前記第1の光伝搬路ユニットの設計仕様を特定するステップと、

前記特定した設計仕様に基づいて、前記第1の光伝搬路ユニットに対する入力光パルス及び出力光パルスの各波形が互いに相似となる準周期定常解を算出するステップとを含むことを特徴とする。

【0022】

更に、請求項2に記載の発明のように、請求項1に記載の発明において、

前記第1の光伝搬路ユニットの後段に第2番目以降の光伝搬路ユニットが一又は複数直列に連結されて成るのが好ましい。

【0023】

更に、請求項3に記載の発明のように、請求項2に記載の発明において、

前記算出した準周期定常解に基づいて、前記第2番目以降の光伝送路ユニットの設計仕様を特定するステップを更に含むのが好ましい。

【0024】

更に、請求項4に記載の発明のように、請求項1～3のうち何れか一項に記載の発明において、

前記設計仕様は、少なくとも、前記各光伝搬路ユニットの非線形媒質及び分散媒質の各々が有する非線形係数、分散値及び光伝搬方向の長さ、と、前記入力光パルスのパワーピークとを含むのが好ましい。

【0025】

更に、請求項5に記載の発明のように、請求項4に記載の発明において、

前記第1の光伝搬路ユニットの設計仕様に含まれる非線形媒質、分散媒質の各一般化分散値を $s_1$ 、 $s_2$ とし、当該非線形媒質、分散媒質が各々有する各光伝搬方向の規格化長さを $K_1$ 、 $L_1$ とすると、 $s_2$ は異常分散に属する値であると共に下記条件式を満たし、且つ、 $K_1$ 、 $L_1$ の各値は下記条件式を満たすのが好ましい。



$$0 \leq |s_1| < 1 < s_2$$

$$L_1 < K_1$$

$|s_1|$  ;  $s_1$  の絶対値

【0026】

更に、請求項6に記載の発明のように、請求項5に記載の発明において、

前記複数の光伝搬路ユニットのうち前記第1の光伝搬ユニットから数えて第n番目（nは2以上の自然数）に連結された光伝搬路ユニットの設計仕様に含まれる非線形媒質、分散媒質の各一般化分散値を $s_{1n}$ 、 $s_{2n}$ とし、当該非線形媒質、分散媒質が各々有する各光伝搬方向の長さを $K_n$ 、 $L_n$ とすると、 $s_{2n}$ は異常分散に属する値であると共に下記条件式を満たし、且つ、 $L_n$ 、 $K_n$ の各値は下記条件式を満たすのが好ましい。

$$s_{1n} = s_1 / \alpha^{n-1}$$

$$s_{2n} = s_2 / \alpha^{n-1}$$

$$K_n = K_1 / \alpha^{n-1}$$

$$L_n = L_1 / \alpha^{n-1}$$

$\alpha$  ; 圧縮率

【0027】

更に、請求項7に記載の発明のように、請求項5に記載の発明において、

前記複数の光伝搬路ユニットのうち前記第1の光伝搬ユニットから数えて第n番目（nは2以上の自然数）に連結された光伝搬路ユニットの設計仕様に含まれる非線形媒質、分散媒質の各一般化分散値を $s_{1n}$ 、 $s_{2n}$ とし、当該非線形媒質、分散媒質が各々有する各光伝搬方向の長さを $K_n$ 、 $L_n$ とすると、 $s_{2n}$ は異常分散に属する値であると共に下記条件式を満たし、且つ、 $L_n$ 、 $K_n$ の各値は下記条件式を満たすのが好ましい。

$$s_{1n} = s_1 / \alpha^{n-1}$$

$$s_{2n} = s_2$$

$$K_n = K_1 / \alpha^{n-1}$$

$$L_n = L_1 / \alpha^{2(n-1)}$$

$\alpha$  ; 圧縮率

【0028】

更に、請求項8に記載の発明のように、請求項1～7のうち何れか一項に記載の発明において、

前記入力光パルスは、準周期定常解に近い波形を有する光パルスであるのが好ましい。

【0029】

更に、請求項9に記載の発明のように、請求項1～8のうち何れか一項に記載の発明において、

前記非線形媒質に係る非線形係数、損失係数を、それぞれ $\nu$ 、 $\delta$ とすると、該非線形媒質は、 $\nu$ 、 $\delta$ が下記条件式を満たす高非線形媒質であるのが好ましい。

$$z = - (1 / 2\delta) \ln (1 - (2\delta / a_0^2 \nu) \xi)$$

z ; 光パルス成形器内における非線形媒質の光伝搬路方向の長さの総計を実距離で表現したもの

$\xi$  ; 光パルス成形器内における非線形媒質の光伝搬路方向の長さの総計を無次元量の規格化距離で表現したもの

$a_0$  ; 非線形媒質が有する光パルスの入力端のパワー減衰係数

$\ln$  ; 自然対数

【0030】

更に、請求項10に記載の発明のように、請求項1～9のうち何れか一項に記載の発明において、

前記非線形媒質に高非線形光ファイバを用い、前記分散媒質にシングルモード光ファイバを用いるのが好ましい。

【0031】

また、上記課題を解決するため、請求項11に記載の発明は、

請求項 1 ～ 1 0 のうちの何れか一項に記載の設計方法に基づいて設計されたことを特徴とする。

#### 【発明の効果】

##### 【0032】

本発明により、非線形媒質及び分散媒質が連結された光伝搬路ユニットを備えた（例えば、光伝搬路ユニットが複数連結されて成る）光パルス成形器から出力される光パルスは、該光パルス成形器に供給されるパルス波形と略同一のピーク／ベデスタル比の波形となる。このため、光パルス成形器から出力される光パルスのパルス波形に生じ得る劣化（歪みの発生）が十分に抑制可能となり、非常に高精度な光パルス列が出力可能となる。

また、入力される光パルスが最初に伝搬する第 1 の光伝搬路ユニットの各媒質の分散値及び長さ、当該入力される光パルスのピークパワーとが決定されれば、後段に設けられる第 2 番目以降の光伝搬路ユニットの各媒質の分散値及び長さが一意に決定できるので、光パルス成形器の設計が非常にやり易くなる。

また、第 1 の光伝搬路ユニットの非線形媒質の分散値がゼロ若しくはゼロ近傍に値を持つような場合には、後段に設けられる第 2 番目以降の光伝搬路ユニットの各非線形媒質の分散値が当該第 1 の光伝搬路ユニットの非線形媒質の分散値に略同一（すなわち、ゼロ若しくはゼロ近傍の値）となるので、光パルス成形器の設計が更に容易となる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

##### 【0033】

以下、本発明を適用した一実施の形態について説明する。

まず、本発明を適用した光パルス成形器 30 を備えた光パルス出力装置 100 の構成について説明し、次いで、光パルス成形器 30 の設計理論について説明し、最後に、この設計理論に基づく光パルス成形器 30 の詳細設計の具体例について説明する。

##### 【0034】

< 光パルス出力装置 100 の構成 >

まず、図 1 を参照して、後述する設計理論に基づく光パルス出力装置 100 の構成について説明する。

##### 【0035】

図 1 に示すように、光パルス出力装置 100 は、光パルス供給器 101 と、この光パルス供給器 101 から供給される光パルスの波形幅を圧縮成形するための光パルス成形器 30 とを備える。

##### 【0036】

光パルス供給器 101 は、2 モードビート光光源（dual-frequency optical source）10 と、光パルス整形器 20 とを備える。

##### 【0037】

2 モードビート光光源 10 は、互いに異なる周波数の CW（Continuous Wave）光を各々発光する二つの LD（Laser Diode）10a、10b と、上記二つの周波数の CW 光を合波してビート光（以下、単に「光パルス」ともいう）を出力する合波器 10c と、該ビート光を増幅する EDF A（Erbium Doped Fiber Amplifier）10d とを備える。

##### 【0038】

光パルス整形器 20 は、光ファイバによって構成され、2 モードビート光光源 10 から出力される光パルスを、後段に連結された光パルス成形器 30 に適した波形に整形する。

##### 【0039】

光パルス成形器 30 は、複数の異なる種類の光ファイバがファイバ長手方向に連結された光伝搬路を成す。光パルス整形器 20 から光パルス成形器 30 に入力された光パルスは、上記光伝搬路を伝搬する過程で圧縮成形される。

##### 【0040】

次に、図 2 を参照して光パルス成形器 30 の構成について説明する。

##### 【0041】

図 2 に示すように、光パルス成形器 30 は、互いに異なるパラメータ（分散値、ファイ

バ長手方向の長さ等であり、以下同じ)を有する光ファイバ、すなわち、非線形媒質としての非線形光ファイバ30a、30b、30cと、分散媒質としての分散光ファイバ31a、31b、31cとがファイバ長手方向に交互に連結されている。以下、非線形媒質と分散媒質が一つずつ連結された構成を「一周期」と定義する。図2における光パルス成形器30の例では、三周期の構成である。

#### 【0042】

非線形光ファイバ30aは、分散値を非線形係数で規格化した値である一般化分散値が $s_1$ 、ファイバ長手方向の長さに非線形係数を乗じた規格化長さが $\xi_1$ であり、分散光ファイバ31aは、一般化分散値が $s_2$ 、ファイバ長手方向の規格化長さが $\xi_2 - \xi_1$ であり、非線形光ファイバ30bは、一般化分散値が $s_{12}$ 、ファイバ長手方向の規格化長さが $\xi_3 - \xi_2$ である。また、分散光ファイバ31bは、一般化分散値が $s_{22}$ 、ファイバ長手方向の規格化長さが $\xi_4 - \xi_3$ であり、非線形光ファイバ30cは、一般化分散値が $s_{13}$ 、ファイバ長手方向の規格化長さが $\xi_5 - \xi_4$ であり、分散光ファイバ31cは、一般化分散値が $s_{23}$ 、ファイバ長手方向の規格化長さが $\xi_6 - \xi_5$ である。

#### 【0043】

また、非線形光ファイバ30a、30b、30cには、光パルス $u_{11}(t)$ 、光パルス $u_{12}(t)$ 、光パルス $u_{13}(t)$ がそれぞれ入力し、分散光ファイバ31cからは光パルス $u_{14}(t)$ が出力される( $t$ は時間)。

#### 【0044】

<光パルス成形器30の設計理論>

次に、上記構成を有する光パルス成形器30に対する設計理論について説明する。

まず、光パルス成形器30中の最初の周期である非線形光ファイバ30aおよび分散光ファイバ31aを伝搬する光パルスの準周期定常解の算出を行う。

#### 【0045】

一般に、光ファイバ中を伝搬する光パルスの振る舞いは、非線形シュレディンガー方程式

#### 【数1】

$$i \frac{\partial Q}{\partial Z} - \frac{k''(Z)}{2} \frac{\partial^2 Q}{\partial T^2} + \gamma(Z) |Q|^2 Q = -i \frac{L(Z)}{2} Q$$

により記述される。

#### 【0046】

ここで、 $Q(Z, T)$  [ $W^{1/2}$ ]は電場の包絡線振幅、 $Z$  [m]は光ファイバのファイバ長手方向の距離、 $T$  [s]は搬送波の群速度で伝搬する座標軸からの遅延時間である。

#### 【0047】

また、 $k''(Z)$  [ $s^2/m$ ]、 $\gamma(Z)$  [ $W^{-1}m^{-1}$ ]、 $L(Z)$  [ $m^{-1}$ ]は、それぞれファイバの分散値、非線形係数及び損失係数であり、ファイバ長手方向に対して変化するものとする。

#### 【0048】

そして、定数 $Z_0$  [m]、 $T_0$  [s]、 $P_0$  [W]を導入し、振幅、距離及び時間に対して無次元量

#### 【数2】

$$q = \frac{Q}{\sqrt{P_0}}, z = \frac{Z}{Z_0}, t = \frac{T}{T_0}$$

を定義して数式(1)を変数変換すると、

#### 【数3】

$$i \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{d(z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \nu(z) |q|^2 q = -i \delta(z) q$$

が得られる。

#### 【0049】

ここで、

【数 4】

$$d = -k'' \frac{Z_0}{T_0^2}, \quad \nu = \gamma P_0 Z_0, \quad \delta = \frac{L}{2} Z_0$$

は、それぞれ規格化された分散値、非線形係数及び損失係数であり、無次元量である。

【0 0 5 0】

また、光ファイバのパラメータを表現する際に一般に用いられる単位系に基づく分散値  $D$  [ps/nm/km]、非線形係数  $\gamma$  [W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>]、損失係数  $L$  [dB/km] と、上記各規格化値との関係は、

【数 5】

$$d = \frac{5(\lambda_0[\mu\text{m}])^2}{\pi c[\times 10^8 \text{m/s}]} \frac{Z_0[\text{km}]}{(T_0[\text{ps}])^2} D[\text{ps/nm/km}]$$

【数 6】

$$\nu = \gamma [\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}] P_0 [\text{W}] Z_0 [\text{km}]$$

【数 7】

$$\delta = \frac{\ln 10}{20} L [\text{dB/km}] Z_0 [\text{km}]$$

である。

【0 0 5 1】

ここで、 $\lambda_0$  [μm] は搬送波の真空中における波長、 $c$  [ $\times 10^8$  m/s] は光速である。以降は  $c = 2.998$  とし、さらに搬送波の波長を  $\lambda_0 = 1.555$  [μm] とするが、この条件によって一般性が失われることはない。

【0 0 5 2】

例として、 $Z_0 = 1$  [km]、 $T_0 = 1$  [ps]、 $P_0 = 1$  [W] とすると、規格化分散値  $d = 1.284D$ 、規格化非線形係数  $\nu = \gamma$ 、規格化損失係数  $\delta = 0.1151L$  という関係が得られる。SMF (Single Mode Fiber) の場合、 $D = 16$  [ps/nm/km] なる規格化分散値は  $d = 20.54$  という値に、 $\gamma = 1.3$  [W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>] なる規格化非線形係数は  $\nu = 1.3$  という値に、そして、 $L = 0.2$  [dB/km] なる規格化損失係数は  $\delta = 0.023$  という値に変換される。

【0 0 5 3】

上記規格化された数式 (3) では、規格化分散値  $d(z)$ 、規格化非線形係数  $\nu(z)$ 、規格化損失係数  $\delta(z)$  の各々が、ファイバ長手方向に対して変化する関数となっているが、更に変数変換を施すことにより、当該各規格化係数が簡単化できる。

【0 0 5 4】

まず、

【数 8】

$$a(z) = a(0) \exp \left[ - \int_0^z \delta(z') dz' \right]$$

と定義される関数  $a(z)$  を用いて

【数 9】

$$q(z, t) = a(z) u(z, t)$$

とおくと、数式 (3) は、

【数 1 0】

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{d(z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a^2(z) v(z) |u|^2 u = 0$$

に変形される。ここで、 $a_0 = a(0) > 0$  とする。

【0 0 5 5】

更に、新たな距離スケールとして、

【数 1 1】

$$\zeta = f(z) = \int_0^z a^2(z') v(z') dz'$$

を定義する。

【0 0 5 6】

ここで、 $a^2(z) v(z)$  は常に正であるから、 $\zeta$  と  $z$  とは一对一の対応関係を有する。従って、 $z$  は、 $z = f^{-1}(\zeta)$  と表される。

【0 0 5 7】

この  $\zeta$  を用いて数式 (1 0) に対し、 $z$  の変数変換を施すと、

【数 1 2】

$$i \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{s(\zeta)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u = 0$$

が得られる。

【0 0 5 8】

ここで、

【数 1 3】

$$s(\zeta) = \frac{d(z)}{a^2(z) v(z)} = \frac{d(f^{-1}(\zeta))}{a^2(f^{-1}(\zeta)) v(f^{-1}(\zeta))}$$

である。

【0 0 5 9】

数式 (1 3) により定義される  $s(\zeta)$  は、規格化分散値  $d$  を、ファイバ損失によるパワー減衰係数  $a(z)$  (数式 (8) の定義を参照) と、規格化非線形係数  $v(z)$  とで割ることによって、分散値を再規格化して一般化したものである。この  $s(\zeta)$  を、以下、一般化分散値と呼ぶ。

【0 0 6 0】

結局、数式 (1 2) のように変形された式では、分散値のみがファイバ長手方向に変動していることとなる。つまり、分散値  $D$  [ps/nm/km]、非線形係数  $\gamma$  [W<sup>-1</sup> Km<sup>-1</sup>]、そして損失係数  $L$  [dB/km] がファイバ長手方向に任意のプロファイルを持つ場合であっても、数式 (9)、(1 1)、(1 3) の変換を行うことにより、パワー損失が零で非線形係数がファイバ長手方向に一定値を持ち、分散値のみがファイバ長手方向に変化するような系 (規格化空間) に変換が可能となる。逆に、上記規格化空間でなされた議論は、定数  $L_0$  [m]、 $T_0$  [s]、 $P_0$  [W] を任意に設定した逆変換を施すことにより任意の実空間に適用することができる。

【0 0 6 1】

ここで、第 1 光伝搬路ユニット 3 a の分散値  $s(\zeta)$  がファイバ長手方向  $\zeta$  に対して変化する様子を図 3 に示す (第 2 光伝搬路ユニット 3 b、3 c についても以下同様)。当該図を、以下、分散マップと呼ぶ。

【0 0 6 2】

$\zeta_1$  は非線形光ファイバ 3 0 a のファイバ長手方向の長さであり、 $\zeta_2$  は第 1 光伝搬路

ユニット 3 a のファイバ長手方向の長さである。なお、 $0 < |s_1| \ll 1 < s_2$  かつ  $1 \gg \xi_2 - \xi_1 > 0$  で、 $\xi_1$  は極端に大きくも小さくもない量であるとする。すなわち、所定の微小量  $0 < \varepsilon \ll 1$  を用いて上記各値を定量的に表現すると、 $|s_1| \sim O(\varepsilon)$ 、 $s_2 \sim O(1/\varepsilon)$ 、 $\xi_1 \sim O(1)$ 、 $\xi_2 - \xi_1 \sim O(\varepsilon)$  と表せる。また、数式 (12) から、非線形係数は任意の点で 1 である。

【0063】

以下、例えば、非線形光ファイバ 30 a に HNL F (Highly-NonLinear Fiber) (実空間における分散値  $D_1 = 0$  [ps/nm/km]、非線形係数  $\gamma_1 = 24$  [W<sup>-1</sup> Km<sup>-1</sup>]、規格化のための定数を  $Z_0 = 1$  [km]、 $T_0 = 1$  [ps]、 $P_0 = 1$  [W] とおいたときの規格化分散値  $d_1 = 0$ 、規格化非線形係数  $\nu_1 = 24$ )、分散光ファイバ 31 a に SMF (同様に、分散値  $D_2 = 16$  [ps/nm/km]、非線形係数  $\gamma_2 = 1.3$  [W<sup>-1</sup> Km<sup>-1</sup>]、規格化分散値  $d_2 = 20.544$ 、規格化非線形係数  $\nu_2 = 1.3$ ) を用いた場合を考える。また、説明簡略化のため、非線形光ファイバ 30 a 及び分散光ファイバ 31 a のエネルギー損失を考えず、数式 (8) において  $a(z) = 1$  とする。このとき、図 3 に示す一般化分散値は、 $s_1 = d_1 / \nu_1 = 0$ 、 $s_2 = d_2 / \nu_2 = 15.8$  である。更に、距離については、実距離で  $Z_1 = 50$  [m]、 $Z_2 = 62.5$  [m] ( $Z_2 - Z_1 = 12.5$  [m]) の場合を考えると、 $z_1 = 0.05$ 、 $z_2 = 0.0625$  により、 $\xi_1 = 1.2$ 、 $\xi_2 = 1.21625$  ( $\xi_2 - \xi_1 = 0.01625$ ) となり、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$  に関する上記条件が満たされる。

【0064】

$O(1)$  のオーダー (order) の振幅及び波形幅を持つ光パルスが、当該分散マップにより表される第 1 光伝搬路ユニット 3 a を伝搬する場合、特に、非線形光ファイバ 30 a の区間  $0 < \xi < \xi_1$  を伝搬する際には、分散の効果が小さく、非線形効果 (Kerr 効果) によってアップチャープが生じるため、結果として周波数帯域 (スペクトルの拡がり) が拡張される。このとき、非線形効果の累積値のオーダーは  $O(1)$  となる。

【0065】

すなわち、非線形係数を一定値 1 としているため、例えば光パルスのピークにおける非線形位相シフト ( $\Delta \phi = \gamma P z$  で与えられる。ここでは、非線形定数  $\gamma = 1$ 、電力  $P \sim O(1)$ 、距離  $z = \xi_1 \sim O(1)$  としている。) の大きさが  $O(1)$  のオーダーとなることを意味する。上記非線形位相シフトの量に限らず、非線形効果によるアップチャープや、スペクトル拡がりの量もオーダー  $O(1)$  となる。

【0066】

一方、上記  $O(1)$  のオーダーの振幅及び波形幅を持つ光パルスが、分散光ファイバ 31 a の区間  $\xi_1 < \xi < \xi_2$  を伝搬する際には、短距離のため非線形効果は弱くなる。また、当該区間における分散値が、大きな正の値 (すなわち、異常分散値) に設定されていることから、この区間における光パルスの伝搬は、略線形的に振る舞い、上記非線形光ファイバ 30 a の区間  $0 < \xi < \xi_1$  における非線形効果により生じたアップチャープが補償され、その結果、光パルスの波形幅が圧縮される。この場合、分散光ファイバ 31 a の分散値のオーダーが  $O(1/\varepsilon)$  に、距離のオーダーが  $O(\varepsilon)$  にそれぞれ設定されていることから、この場合の累積分散値のオーダーは  $O(1)$  となる。

【0067】

ここで、表 1 に、非線形光ファイバ 30 a の区間  $0 < \xi < \xi_1$  と、分散光ファイバ 31 a の区間  $\xi_1 < \xi < \xi_2$  とにおける、距離と、非線形効果の瞬時値と、累積値と、分散効果の瞬時値と、累積値とについてのオーダーを各々示す。

【0068】

【表 1】

区間	距離	非線形効果 (瞬時値)	非線形効果の 累積値	分散効果 (瞬時値)	分散効果の 累積値
$0 < \xi < \xi_1$	$O(1)$	$O(1)$	$O(1)$	$O(\varepsilon)$	$O(\varepsilon)$
$\xi_1 < \xi < \xi_2$	$O(\varepsilon)$	$O(\varepsilon)$	$O(\varepsilon)$	$O(1/\varepsilon)$	$O(1)$

# 【0069】

非線形光ファイバ30aの区間 $0 < z < z_1$ における非線形効果の累積値のオーダーが $O(1)$ であり、その後段に続く分散光ファイバ31aの区間 $z_1 < z < z_2$ における分散の累積値のオーダーが $O(1)$ である点が、従来の光ソリトン（この場合、分散効果及び非線形効果の双方の累積値のオーダーは $O(\varepsilon)$ である。「A. Hasegawa et al., "Guiding-center soliton in optical fibers", Optics Letters, Vol.15, p.1443, 1990」を参照）や、分散マネージメントソリトン（この場合、分散効果の累積値のオーダーは $O(1)$ だが、非線形効果の累積値のオーダーは $O(\varepsilon)$ である。「M. J. Ablowitz et al., "Multiscale pulse dynamics in communication systems with strong dispersion management", Optics Letters, Vol.23, p.1668, 1998」を参照。）が伝搬する光伝搬路と、本発明を適用した図3に示す分散マップにより表される第1光伝搬路ユニット3aとが決定的に違う点である。

# 【0070】

また、第1光伝搬路ユニット3aを伝搬して圧縮された出力光パルスの波形が入力光パルスの波形と完全に相似形になるような光パルスは、平均化法と呼ばれる手法（「J. H. B. Nijhof et al., "The averaging method for finding exactly periodic dispersion-managed solitons", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, vol.6, pp.330-336, 2000」を参照）を用いた数式（12）による直接数値計算により求められる。

# 【0071】

ここで、入力光パルスの波形と出力光パルスの波形とが相似であるとは、何れかの波形の振幅と時間とに対し所定の変数変換を行うと、もう一方の波形に一致することを意味する。すなわち、入力光パルスの波形 $u_{in}(t)$ が第1光伝搬路ユニット3aを伝搬した後に出力される出力光パルスの波形を $u_{out}(t)$ とし、波形 $u_{in}(t)$ を、所定の定数 $\alpha$ （以下、圧縮率という）を用いて

# 【数14】

$$u'(t) = \sqrt{\alpha} u_{in}(\alpha t)$$

と変数変換すると、 $u'(t) = u_{out}(t)$ となる場合を言う。

# 【0072】

数式（14）の変数変換は、入力光パルスの波形の振幅を $\alpha^{1/2}$ 倍、幅を $1/\alpha$ 倍することに相当し、当該変換により、 $\alpha > 1$ の場合にはパルスエネルギーは保持されたまま波形幅が $1/\alpha$ に圧縮されることとなる。

# 【0073】

次に、上記平均化を行う上での光パルスの初期波形（入力光パルスの波形）を $u_0(t) = P_0^{1/2} \text{sech}(t)$ とした場合について説明する。ここで、 $P_0$ は光パルスのピークパワーを表す。この光パルスが第1光伝搬路ユニット3aを伝搬して出力される出力光パルスの波形 $u_0'(t)$ は、非線形効果によるスペクトル拡がり、異常分散とによる二つの効果の相互作用により波形幅が圧縮され、ピークパワーはもとの値 $P_0$ から、他の値 $P_0'$ に増大される。

# 【0074】

そこで、 $\alpha = P_0' / P_0$ としてこの $\alpha$ を用い、圧縮された出力光パルスの波形 $u_0'(t)$ を、

# 【数15】

$$u_0''(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} u_0'\left(\frac{t}{\alpha}\right)$$

のように変数変換する。

# 【0075】

次に、光パルスの中心位置 $t = 0$ における $u_0''(t)$ の位相 $\theta_0''$ が、伝搬前の位相 $\theta_0$ に一致するよう、パルス全体の位相をシフトさせる。そして $u_0''(t)$ のピークパワ

$-P_0'$  がもとの値  $P_0$  に一致するように、パルスの振幅全体を増幅若しくは減衰させ、入力光パルスの波形  $u_0(t)$  と足し合わせて 2 で割ることにより平均化計算が一回終了する。

【0076】

このようにして得られた  $u_1(t)$  を、式を用いて表すと、

【数16】

$$u_1(t) = \frac{1}{2} \left[ u_0(t) + \sqrt{\frac{P_0}{P_0''}} u_0''(t) e^{i(\theta_0 - \theta_0'')} \right]$$

となる。

【0077】

次いで、 $u_1(t)$  を入力光パルスの波形として上記平均化計算を再び行うことにより、 $u_2(t)$  が得られる。なお平均化計算の二回目以降では、一回目に決定した圧縮率  $\alpha$  を用いる。

【0078】

以上のような平均化計算を繰り返し行うことにより、圧縮後の出力光パルスの波形が入力光パルスの波形に相似となる。実際には、上記平均化計算を100回程度繰り返すことにより、入力光パルスと出力光パルスの各波形が高い精度で相似するような入力光パルスが得られる。

【0079】

ここで、上記説明した準周期定常解を数値的に得る手順を、下記 (i) ~ (iv) にまとめる；

(i) 図3に示す分散マップ（第1光伝搬路ユニット3aが有する分散マップ）を決める、(ii) 得たい光パルスのピークパワー  $P_0$  を決める、(iii) 入力光パルスとして  $P_0^{1/2} \text{sech}(t)$  を第1光伝搬路ユニット3aに伝搬させ、出力光パルスのピークパワーと入力光パルスのピークパワーとの比をとって、圧縮率  $\alpha$  を決定する、(iv) 決定した圧縮率  $\alpha$  を用いて数式(15)の変数変換を行い、位相とピークパワーとを調整した後、平均化計算を繰り返し、周期定常解としての光パルスに収束させる。

【0080】

こうして得られた光パルスの解は、予め設定するピークパワー  $P_0$  と、最初に伝搬する第1光伝搬路ユニット3aを伝搬後に特定される圧縮率  $\alpha$  とを持つ、準周期定常解である。この準周期定常解は、本発明者らが発見したものであって、パルス伝搬に関して従来と異なり、まったく新しい様相を呈するものである。

【0081】

なお以上においては、厳密な周期定常解を得る方法として平均化法による手法を示したが、近似的な解を得る手段として、以下が考えられる。すなわち、伝送路のパラメータと圧縮率をあらかじめ決めておき、例えばパルス波形をガウス型関数とし、振幅、幅、チャープなどのパラメータを任意に変更して得られるそれぞれの光パルスに対して、与えた伝送路上で一周期伝搬させ、数式(15)の変数変換を行い、それぞれのパラメータが入力時の値に最も近くなるようなパラメータの組み合わせを探し出し、最適な組み合わせによって与えられるパルスをもって近似的な定常パルスとすることもできる。

【0082】

次に、上記光パルスの準周期定常解を例示する。

図3に示す分散マップにおいて、 $s_1 = 0$ 、 $s_2 = 15.8$ 、 $\xi_1 = 1.2$ 、 $\xi_2 = 1.21625$  ( $\xi_2 - \xi_1 = 0.01625$ ) を設定する。入力パルス  $u_0(t) = P_0^{1/2} \text{sech}(t)$  のピークパワーを  $P_0 = 2$  とすると、当該分散マップに対応する第1光伝搬路ユニット3aを伝搬した後の出力光パルスのピークパワーは、当初の1.97178倍の3.94356になる。

【0083】

ここで、 $\alpha = 1.97178$  とする。この圧縮率  $\alpha$  を用いて上記平均化計算を100回行って得ら



れた光パルスの振幅の絶対値(実線)と瞬時周波数(破線)とを図4に示す。なお、瞬時周波数は、位相の時間微分に“ $-1$ ”を乗じた値として定義される。

#### 【0084】

図5には、図4に示す波形を、第1光伝搬路ユニット3a中に更に伝搬させた波形であり、波形幅が $1/\alpha=0.507$ 倍に圧縮されていることがわかる。

#### 【0085】

図6には、図5に示す波形に対して、数式(15)に相当する変数変換を行った後の波形である。この波形が図4に示す波形と正確に一致することから、圧縮前後の波形(すなわち、第1光伝搬路ユニット3aに対する入力光パルスの波形と出力光パルスの波形)が完全に相似であることが確認できる。

#### 【0086】

図4に示す波形は、第1光伝搬路ユニット3aを伝搬後に変数変換を行うと、もとの波形(入力光パルスの波形)に戻るので、準周期定常解である。

#### 【0087】

図4に示す波形の特徴としては、時間に対して非線形に変化する瞬時周波数(非線形チャープ。)を持つ点、特にパルスの中心付近ではダウンチャープを持つ点、そして、僅かなペDESTALを持つ点等がある。

#### 【0088】

また、図7に示す波形は、図4に示す波形を対数表示したものであり、放物線に近い形として表されている。この結果は、光パルスの中心部分がガウス型関数により精度よく近似できることを示している。

#### 【0089】

次に、上記算出した準周期定常解としての光パルスの特徴について説明する。以下では、更に、この準周期定常解としての光パルスと、従来知られている光ソリトン(すなわち、平均化ソリトン、分散マネジメントソリトン)との違いについても説明する。

#### 【0090】

平均化ソリトン(ガイディングセンターソリトン;「A. Hasegawa et al., “Guiding-center soliton in optical fibers”, Optics Letters, vol.15, pl443-1445, 1990」を参照)は、短い周期(ソリトンの分散距離に比べて十分短い増幅器間隔、若しくは分散マネジメント周期。以下、 $0<\varepsilon\ll 1$ なる $\varepsilon$ を用いて、 $O(\varepsilon)$ と表現する)内で、オーダーが $O(1)$ の摂動(すなわち、ファイバ長手方向に対して変動する非線形効果若しくは分散効果。)が加わるため、一周期(例えば、第1光伝搬路ユニット3aと同様な非線形光ファイバと分散光ファイバとが連結された光伝搬路)にわたる非線形効果及び分散効果の両効果の累積値は、それぞれ $O(\varepsilon)$ のオーダーとなる。

#### 【0091】

また、分散マネジメントソリトン(「N.J. Smith et al., Electronics Letters, vol.32, p.54, 1996」を参照)は、 $O(\varepsilon)$ のオーダーの短い周期(平均分散値に対応する分散距離、若しくは非線形距離と比較して十分短い距離)内で、大きな局所分散値( $O(1/\varepsilon)$ )のオーダーとする。)が加わるため、一周期(例えば、正常分散光ファイバと異常分散光ファイバとが連結された光伝搬路)にわたる摂動による分散効果の累積値のオーダーが $O(1)$ で、非線形効果の累積値のオーダーが $O(\varepsilon)$ となる。特にチャープに注目すると、例えば、大きな正常分散によって生じる線形アップチャープがオーダー $O(1)$ の大きさで蓄積した後、大きな異常分散によって線形ダウンチャープが蓄積される。ここで、平均分散値が小さく設定されているので、当該二つの線形チャープはほぼキャンセルされる。このような性質から、分散マネジメントソリトンは、局所的には分散効果が支配的な線形パルスであるとみなせ、小さな非線形効果が分布的に分散効果と打ち消しあうことにより形成される周期定常解としてのパルスである。なお、正常分散と異常分散の順序は逆であってもよい。

#### 【0092】

一方、本実施の形態における第1光伝搬路ユニット3aを伝搬する準周期定常解として

の光パルスは、オーダーが $O(1)$ の距離（非線形光ファイバ30aの長さ）にわたり、オーダーが $O(1)$ の強さで非線形効果が加わる。さらに、オーダーが $O(\varepsilon)$ の距離（分散光ファイバ31aの長さ）にわたり、 $O(1/\varepsilon)$ のオーダーの強さで分散効果が加わると考えられる。このため、両効果の各々が一周期（第1光伝搬路ユニット3a）にわたって累積される量は、共に $O(1)$ のオーダーとなる。従って、本実施の形態における準周期定常解としての光パルスは、平均化ソリトンや分散マネージメントソリトンとは、パルス伝搬メカニズムが決定的に異なる。

#### 【0093】

すなわち、本実施の形態における準周期定常解としての光パルスは、第1光伝搬路ユニット3aを伝搬することにより、スペクトル拡がりを伴う非線形効果によるアップチャープ（非線形チャープ）が引き起こされ、次に異常分散効果によるダウンチャープ（線形チャープ）により当該アップチャープが補償されて、チャープがもとの状態に回帰される。この際、光パルスの波形幅が圧縮されるという大きな特徴が生じる。

#### 【0094】

ここで、平均化ソリトン、分散マネージメントソリトン及び本実施の形態における準周期定常解としての光パルスの特徴を比較してまとめた結果を表2に示す。

#### 【0095】

【表2】

区間	非線形効果の累積値	分散効果の累積値	中心部の関数形	ペデスタル
平均化ソリトン	$O(\varepsilon)$	$O(\varepsilon)$	sech型	なし
分散マネージメントソリトン	$O(\varepsilon)$	$O(1)$	Gauss型	あり
準周期定常解としての光パルス	$O(1)$	$O(1)$	Gauss型	あり

#### 【0096】

分散マネージメント伝搬系において累積分散値を小さくしていくと、分散マネージメントソリトンは平均化ソリトンに漸近していくことが知られている。本実施の形態における準周期定常パルスの場合にも、一周期の長さを短くして、非線形効果と分散効果の累積値を小さくしていくと、圧縮率 $\alpha$ は1に近づき、断熱ソリトン圧縮（「Chernikov et al., Electronics Letters, vol.29, p.1788, 1993」を参照）現象に漸近する。

#### 【0097】

図4～図7に示す波形は、図3において $s_1 = 0$ （零分散）のときに得られる波形であるが、本実施の形態における準周期定常解としての光パルスは、 $s_1$ が、ゼロを含む略ゼロ近傍内の所定値を持つと、符号に応じてその特徴が変化する。

#### 【0098】

そこで次に、 $s_1 = -0.05314$ 、 $0$ 、 $0.05314$ の三通りの場合に、入力光パルスを $P_0^{1/2} \text{sech}(t)$ としてピークパワー $P_0$ を変化させたときの各収束解を、それぞれ平均化法により求める。ピークパワー $P_0$ に対する圧縮率 $\alpha$ と、収束解の電力半値幅とをそれぞれ図8、図9に示す。ここで、実線、破線、点線は、それぞれ $s_1 = -0.05314$ 、 $0$ 、 $0.05314$ の結果を示す。

#### 【0099】

図8に示すように、 $P_0 < 2.5$ の場合には、 $s_1$ に対する依存性は見られないが、 $P_0 > 2.5$ の場合には、 $s_1 = 0.05314$ （異常分散）の際に圧縮率が小さくなる。一方、収束した光パルスの波形幅は、 $s_1$ の値に対して定量的にある程度の依存性を示してはいるものの、定性的には大きな依存性は認められない。

#### 【0100】

図10に示すように、 $P_0 = 2$ としたときの、 $s_1$ の上記各値に対する波形が示されているが、実線で示す $s_1 = -0.05314$ の波形が最もペデスタルが小さい。図8に示す結果により圧縮率はほぼ $\alpha \sim 2$ であり、半値幅も大きく変わらないので、ペデスタルが小さな

波形を得るためには、分散値 $s_1$ を負の値（正常分散）に設定するのが好ましい。

#### 【0101】

また、収束解としての光パルスの波形幅を変化させたい場合には、分散光ファイバ31aの分散値 $s_2$ を変化させればよい。ここで、 $P_0 = 2$ 及び $\alpha = 2$ に固定し、 $s_2$ を変化させて得られる収束解としての光パルスの波形を図11に示す。

#### 【0102】

図11に示すように、分散光ファイバ31aの分散値が大きくなると、ペデスタルの大きさは保たれたまま、波形幅が増大する。図12には、 $s_2$ に対する収束解の電力半値幅の値が示されており、 $s_2$ と電力半値幅とが、ほぼ比例関係となっている。

#### 【0103】

分散光ファイバ31aでは非線形効果が小さく無視でき、累積分散値のみがパルス伝搬に影響するとしてよいので、 $s_2$ を変化させる代わりに、 $s_2 - s_1$ 、つまり分散光ファイバ31aのファイバ長手方向の長さを変化させてもよい。

#### 【0104】

結局、ピークパワー $P_0$ 及び圧縮率 $\alpha$ を任意に設定した後、分散光ファイバ31aの分散値若しくはファイバ長手方向の長さを変化させて累積分散値を適切に設定することにより、収束パルスの幅を変化させることができる。

#### 【0105】

上記のように、第1光伝搬路ユニット3aを伝搬した後の出力光パルスの波形に対して数式(15)の変数変換を行うと、入力光パルスの波形と完全に一致することから、光パルスは周期定常状態として第1光伝搬路ユニット3aを何回でも繰り返して伝搬可能となる（第1光伝搬路ユニット3aが複数連結されている場合を前提とする）。

#### 【0106】

一方、数式(15)の変数変換を行う代わりに図3に示す分散マップを一周期毎に（すなわち、光伝搬路ユニット毎に）変化させても、全く同じ結果が得られる。

以下、詳細に説明する。

#### 【0107】

分散マップ $s(\xi)$ として図3を考え、入力パルスを $u(t)$ として数式(11)を再度書き下すと、

#### 【数17】

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{s(\xi)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u = 0$$

となる。

#### 【0108】

ここで、一周期伝搬後に波形幅が圧縮された光パルスの波形を $u'(t)$ とすると、 $u(t)$ と $u'(t)$ との関係は、圧縮率 $\alpha$ を用いて

#### 【数18】

$$u'(t) = \sqrt{\alpha} u(\alpha t)$$

となっている。

#### 【0109】

一方、 $u'(t)$ が新たな分散マップ $s'(\xi)$ を伝搬する様子は、下記方程式により表される。

#### 【数19】

$$i \frac{\partial u'}{\partial \xi} + \frac{s'(\xi)}{2} \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} + |u'|^2 u' = 0$$

#### 【0110】

数式(19)に数式(18)を代入すると、

【数 2 0】

$$i \frac{\partial}{\partial \zeta} \sqrt{\alpha} u'(\alpha t) + \frac{s'(\zeta)}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sqrt{\alpha} u'(\alpha t) + \alpha \sqrt{\alpha} |u'(\alpha t)|^2 u'(\alpha t) = 0$$

が得られる。

【0 1 1 1】

ここで、変数変換

【数 2 1】

$$\zeta' = \alpha \zeta, \tau = \alpha t$$

を行うと、数式 (2 0) は、

【数 2 2】

$$i \frac{\partial u'}{\partial \zeta'} + \frac{\alpha s'(\zeta')}{2} \frac{\partial^2 u'}{\partial \tau^2} + |u'|^2 u' = 0$$

となる。

【0 1 1 2】

ここで、仮に、 $\alpha s'(\zeta') = s(\zeta')$  とするならば、数式 (2 1) は、 $\zeta'$ 、 $\tau$  の座標系で数式 (1 7) に一致する。換言すると、一周期毎に分散マップのファイバ長手方向の長さとは分散値とをそれぞれ  $1/\alpha$  倍すれば、数式 (1 8) の変数変換が一周期毎に行われることとなり、光パルスは、一周期毎に互いに相似な波形として伝搬する。

【0 1 1 3】

この状況を模式図として図 1 3 に示す。ここで、 $n \geq 2$ 、 $\zeta_0 = 0$  とすると、 $\zeta_{2n-1} - \zeta_{2n-2} = (\zeta_{2n-3} - \zeta_{2n-4}) / \alpha = \zeta_1 / \alpha^{n-1}$ 、 $\zeta_{2n} - \zeta_{2n-1} = (\zeta_{2n-2} - \zeta_{2n-3}) / \alpha = (\zeta_2 - \zeta_1) / \alpha^{n-1}$  である。

【0 1 1 4】

一方、図 3 に示す分散マップにおいて、 $0 < |s_1| \ll 1 \ll s_2$  且つ  $\zeta_1 \gg \zeta_2 - \zeta_1$  の場合を考えているので、第 1 光伝搬路ユニット 3 a の区間  $\zeta_1 < \zeta < \zeta_2$  では分散効果が支配的で、非線形効果はほぼ無視できる。そこで、一周期毎に、ファイバ長手方向の長さとは分散値とをそれぞれ  $1/\alpha$  倍する代わりに、分散値を変えずにファイバ長手方向の長さのみを  $1/\alpha^2$  倍にしても等価な結果が得られる。この場合の分散マップと光パルスの伝搬の様子とを模式図として図 1 4 に示す。ここで、 $n \geq 2$ 、 $\zeta_0 = 0$  とすると、 $\zeta_{2n-1} - \zeta_{2n-2} = (\zeta_{2n-3} - \zeta_{2n-4}) / \alpha = \zeta_1 / \alpha^{n-1}$ 、 $\zeta_{2n} - \zeta_{2n-1} = (\zeta_{2n-2} - \zeta_{2n-3}) / \alpha^2 = (\zeta_2 - \zeta_1) / \alpha^2 (n-1)$  である。

【0 1 1 5】

ここで、 $s_1$  が十分小さい値（ゼロ若しくはゼロ近傍の値）の場合は、 $s_1 = s_{12} = s_{13} = \dots$  としても、同様の結果が得られる。

【0 1 1 6】

< 光パルス成形器 3 0 の設計の具体例 >

図 1 3 に示すような、一周期毎に分散値とファイバ長手方向の長さとはそれぞれ  $1/\alpha$  倍される分散マップを有する光パルス成形器 3 0 に対し、数値計算によって得られる、圧縮率  $\alpha$  の準周期定常解の波形に近い状態の入力光パルスを用いれば、準周期定常解としての光パルスに近い圧縮形態が実際に得られる。以下、このような光パルス成形器 3 0 の設計の具体例を示す。

【0 1 1 7】

本発明における方法に基づく設計においては、様々なパラメータに対する任意性が存在する。よって先に、いくつかの設計指針に対する実際の手順について、簡単に説明する。まず行うべきことは、規格化された空間上における仮の伝搬路を設定し、当該伝搬路を伝搬する光パルスの準周期定常解を求めることである。この手順を経て圧縮率  $\alpha$  が導出され、しかも圧縮率  $\alpha$  は実空間でも同じ値であるため、所望の圧縮率  $\alpha$  を得るために、当該仮

の伝搬路設定と準周期定常解のパラメータ設定とを行う必要がある。仮の伝搬路は、一般化分散値がやはり図3の形態で与えられる。非線形光ファイバ30aのファイバ長手方向の規格化長さ $\xi_1$ と、準周期定常解のピークパワーとを決定する上で重要なのは、非線形光ファイバ30aにおける光パルスの非線形位相シフト量 $\Delta\phi$ である。なぜなら、図8のように圧縮率 $\alpha$ は $\Delta\phi$ にほぼ比例した形をとるため、結果的に非線形光ファイバ30aのファイバ長手方向の規格化長さ $\xi_1$ とピークパワーとの積とが圧縮率 $\alpha$ を支配する。よってそれぞれの値は、後に考慮する設計指針に応じて、任意に設定可能である。分散光ファイバ31aにおける累積分散値と、準周期定常解の幅についても図12のようにほぼ比例の関係であるため、やはりそれぞれの値は任意に設定可能である。では、いくつかの設計指針の例を挙げる。

#### 【0118】

(1) 実空間上のファイバパラメータが決まっている場合で、さらに光パルス成形器30の一周目における非線形光ファイバ30aおよび分散光ファイバ31aの長さが定められている場合：実空間上における伝搬路が設定されているので、規格化空間上の伝搬路は一意に得られる。規格化空間上の準周期定常解のピークパワーを変更することで、図8および図9から得られる値に応じた圧縮率 $\alpha$ および波形幅が得られる。所望の圧縮率 $\alpha$ または波形幅を選択した後、実空間に変換すると、入力光パルスの条件と二周期目以降の設計が決定される。なお、圧縮率 $\alpha$ の値が増すことでピークペデスタル比が増大して都合が悪いようであれば、あえて小さな圧縮率 $\alpha$ を選び、光パルス成形器30内の周期数を増やすことで最終的に所望の圧縮率 $\alpha$ を実現するとしてもよい。

#### 【0119】

(2) 実空間上のファイバパラメータが決まっている場合で、さらに入力光パルスの条件が定められている場合：非線形光ファイバ30aおよび分散光ファイバ31aのファイバ長手方向の長さは任意に変更可能であることから、規格化空間上でも、それぞれの長さを任意に変更してよい。そこで、実空間に変換した後の光パルスが定められた条件にあうような、規格化空間上の準周期定常解が得られるよう、それぞれの光ファイバの規格化空間上のファイバ長手方向の長さを調整する。具体的には、ピークパワーと波形幅を規格化空間上で定めておき、それらの値に対して所望の圧縮率 $\alpha$ に相当する非線形位相シフト量を与える非線形光ファイバ30aのファイバ長手方向の規格化長さ $\xi_1$ と、既定の累積分散値を与える分散光ファイバ31aのファイバ長手方向の規格化長さ $\xi_2 - \xi_1$ を決めることができる。これにより実空間上の設計が確定可能となる。

#### 【0120】

以上の例のように、与えられた設計指針に対して規格化空間上でしかるべき設定、つまり所望の条件を満足する最適値を導出し、これを現実的な設計に反映させるという手順が考えられる。以下では、上記(1)の例に沿った場合の具体例について述べる。ただし伝搬路に関しては段落0063に記載のように予め決定されていて、さらに所望の圧縮率 $\alpha$ の値としては、段落0083に定められた値を考える。つまり、段落0121、0122に記載のような条件設定となる。

#### 【0121】

まず、光ファイバのパワー損失を考慮しない場合について説明する。

以下、一例として、 $P_0 = 2$ 、 $s_1 = 0$ としたときの準周期定常解の伝搬に基づく設計を考える。ここで、準周期定常解の半値全幅を1.43119とし、圧縮率 $\alpha$ を上記算出した1.97178とする。

#### 【0122】

まず、図3に示す分散マップ（すなわち、第1光伝搬路ユニット3a）において、 $s_1 = d_1/\nu_1 = 0$ 、 $s_2 = d_2/\nu_2 = 15.8$ 、 $\xi_1 = \nu_1 z_1 = 1.2$ 、 $\xi_2 = \nu_1 z_1 + \nu_2 (z_2 - z_1) = 1.21625$ とし、 $d_1 = 0$ とする。そして、 $\nu_1 = 24$ 、 $\nu_2 = 1.3$ とすると、 $d_2 = 20.54$ 、 $z_1 = 0.05$ 、 $z_2 = 0.0625$ が定まる。

#### 【0123】

次に、変数変換を行うパラメータを、 $Z_0 = \alpha^n [\text{km}]$ 、 $T_0 = \alpha^n [\text{ps}]$ 、 $P_0 = \alpha^{-n}$

$n$  [W]に設定すると( $n$ は任意の整数)、規格化分散値 $d$ 、規格化非線形係数 $\nu$ 、ファイバ長手方向の長さ $z$ 、時間軸 $t$ 、振幅 $q$ は、実空間においてそれぞれ $D[\text{ps/nm/km}] = 0.784\alpha^n d$ 、 $\gamma[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}] = \nu$ 、 $Z[\text{km}] = \alpha^n z$ 、 $T[\text{ps}] = \alpha^n t$ 、 $Q[\text{W}^{1/2}] = \alpha^{-n/2} q$ のように変換される。

#### 【0124】

更に、分散光ファイバ31aでは非線形効果が無視できると仮定し、分散値を変化させずにファイバ長手方向の長さのみを変化させる方法を用いて(図14に示す分散マップを参照)、例えば、分散値とファイバ長手方向の長さとを、それぞれ $D[\text{ps/nm/km}] = 0.784d$ 、 $Z[\text{km}] = \alpha^{2n} z$ としてもよい。

#### 【0125】

ここで、仮に、 $n=0$ とすれば、 $D_1 = 0[\text{ps/nm/km}]$ 、 $\gamma_1 = 24[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}]$ 、 $D_2 = 16[\text{ps/nm/km}]$ 、 $\gamma_2 = 1.3[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}]$ 、 $Z_1 = 0.05[\text{km}]$ 、 $Z_2 = 0.0625[\text{km}]$ となる。また、規格化空間でピークパワーが2、電力半値幅が1.43119の光パルスは、実軸空間でピークパワー2[W]、電力半値幅1.43119[ps]という値を持つ。この場合の分散値及び非線形係数は、非線形光ファイバ30a、30b、30cにHNLF(分散値0ps/nm/km、非線形係数 $24\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}$ )、分散光ファイバ31a、31b、31cにSMF(分散値16ps/nm/km、非線形係数 $1.3\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}$ )を用いる際に都合がよい。

#### 【0126】

一方、 $n=1$ とすれば、 $D_1 = 0[\text{ps/nm/km}]$ 、 $\gamma_1 = 24[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}]$ 、 $D_2 = 31.55[\text{ps/nm/km}]$ 、 $\gamma_2 = 1.3[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}]$ 、 $Z_1 = 0.098589[\text{km}]$ 、 $Z_2 = 0.1232362[\text{km}]$ となる。また、規格化空間でピークパワーが2、電力半値幅が1.43119の光パルスは、実軸空間でピークパワー1.0143[W]、電力半値幅2.822[ps]という値を持つ。なお、分散光ファイバ31aでは分散効果が支配的であるとすると、 $D_2 = 16[\text{ps/nm/km}]$ 、 $Z_2 = 0.147188[\text{km}]$ としても等価である。

#### 【0127】

このように、 $n$ の値を変えることで、任意のスケールで入力光パルスのパラメータと、分散マップの一周目(すなわち、第1光伝搬路ユニット3a)の設計を決めることができる。

#### 【0128】

次に、 $n=1$ の場合について、具体的な設計例と、当該設計例に基づいて行った数値計算による光パルスの圧縮の様子を示すシミュレーション結果とを示す。

#### 【0129】

準周期定常解は、パルス中心付近についてはガウス型関数で近似できるが小さなベデスタルと非線形チャープとを有する(図4を参照)。しかし、以下では、入力光パルスとして、ピークパワーが1.0143[W]、電力半値幅が2.822[ps]であるチャープフリーのガウス型パルスを考える。

#### 【0130】

一周目の伝搬路(すなわち、第1光伝搬路ユニット3a)の設計は、上記内容から、 $D_1 = 0[\text{ps/nm/km}]$ 、 $\gamma_1 = 24[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}]$ 、 $D_2 = 16[\text{ps/nm/km}]$ 、 $\gamma_2 = 1.3[\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}]$ 、 $Z_1 = 0.098589[\text{km}]$ 、 $Z_2 = 0.147188[\text{km}]$ として設計する。

#### 【0131】

二周期目以降の伝搬路(すなわち、第2光伝搬路ユニット3b、3c以降)の設計は、圧縮率 $\alpha$ の値と、図14の分散マップに示す方法とを用いて決定できる。

#### 【0132】

この場合、圧縮率 $\alpha$ としては、上記算出した圧縮率 $\alpha = 1.97178$ を用いるのが好ましいが、有効性を確かめるために、圧縮率を $\alpha' = 1.8$ 、2.0、2.2として二周期目以降の伝搬路設計を行った場合の、光パルスの圧縮の様子を、数式(1)の直接数値計算を行うことによって調べる。ここで、ファイバ損失や高次の分散性及び非線形性を無視する。

#### 【0133】

ここで、表3に、上記圧縮率 $\alpha'$ の各値につき、HNLF長、SMF長、出力パルスの

幅及び圧縮率（入出力光パルスそれぞれの波形幅の比）を示す。入力光パルスと一周期目の伝搬路とは、全ての $\alpha'$ の値に対し共通であるとする。

【0 1 3 4】

【表 3】

		$\alpha' = 1.8$	$\alpha' = 2.0$	$\alpha' = 2.2$
一周期目	HNLF長[m]	98.589	$\alpha' = 1.8$ と同じ	$\alpha' = 1.8$ と同じ
	SMF長[m]	48.599		
	出力光パルスの幅[ps]	1.413		
	圧縮率	1.997		
二周期目	HNLF長[m]	54.7717	49.2945	44.8132
	SMF長[m]	14.9997	12.1497	10.0411
	出力光パルスの幅[ps]	0.778	0.720	0.698
	圧縮率	1.816	1.963	2.024
三周期目	HNLF長[m]	30.4287	24.6473	20.3696
	SMF長[m]	4.62953	3.03743	2.07461
	出力光パルスの幅[ps]	0.459	0.371	0.351
	圧縮率	1.695	1.941	1.989

【0 1 3 5】

圧縮率が理想値に近い $\alpha' = 2.0$ の場合には、三周期目の出力光パルス（すなわち、第3光伝搬路ユニット3cから出力される光パルス）の波形幅が0.371psに圧縮されるのに対して、圧縮率が $\alpha' = 1.8$ の場合には、波形幅が0.459psまでしか圧縮されない。一方、圧縮率が $\alpha' = 2.2$ の場合には、三周期目の出力光パルスの波形幅が0.351psにまで圧縮される。

【0 1 3 6】

上記圧縮率 $\alpha'$ の各値につき、二周期目及び三周期目の出力光パルスの波形の時間とパワーとを規格化したものを、図4に示す数値的に得られた準周期定常解と重ねて図15～図20にプロットして示す。実線は、当該圧縮率 $\alpha'$ を用いた場合のパルス圧縮の結果を示し、破線は図4に示す準周期定常解を示す。

【0 1 3 7】

また、図15～図20に示すように、圧縮率が $\alpha' = 2.0$ の場合には、光パルスの波形は、準周期定常解に最も近い波形を保ちながら圧縮されている。波形が準周期定常解からズレが生じると、光パルスが周期を重ねて伝搬する毎に該光パルスの圧縮波形に大きな歪みが生じることとなり、好ましくない。また、光パルスのパワーが準周期定常解に比べて減少しているが、これは入力光パルスと準周期定常解との間のズレに起因するパワー損失であると考えられる。このパワー損失は、実際に光パルスの圧縮を行う際には、光パルスのパワーにプリエンファシス（準周期定常解は非線形チャープ、特に中心付近ではダウンチャープを持っているが、これを分散補償することでチャープフリーの状態に近づけたときに、ピークパワーはある程度大きくなる。入射パルスがそのときのピークパワーを持つように調整することを、プリエンファシスを加えることと定義する）を加えることにより補償可能である。

【0 1 3 8】

ここで、入力光パルスにチャープフリーガウシアンを用いても、実際の出力光パルスは準周期定常解としての光パルスに近いものとなる。このため、入力光パルスの波形にはある程度のマージンがあり、例えば、sech型パルス等を用いた場合でも、得られる結果

に大差はない。

#### 【0139】

更に、準周期定常解の中心部分はダウンチャープを持つため、HNLF への入射時には光パルスがダウンチャープを有していることが必要となる。SMF 長はそうように設計されなければならないが、表3に示す設計結果は、この点が反映されたものとなっている。

#### 【0140】

なお、表3に示す内容では、二周期目や三周期目の出力光パルスの幅が1psより小さくなっているが、このような場合、厳密には高次分散やラマン自己周波数シフト等の高次効果の影響を考慮しなければならない。

#### 【0141】

次に、光ファイバのパワー損失を考慮した場合について説明する。

光ファイバ自体に生じるパワー損失や光ファイバ同士の接続部に生じるパワー損失等によるパワー低下が生じるような場合には、その低下分に合わせて非線形光ファイバ30aのファイバ長手方向の長さ長くすることにより(effective lengthに相当、「G.P.Agrawal, “Nonlinear Fiber Optics”, Academic Press, 3rd. ed., p98, 2001」を参照)、当該パワー低下が容易に補償可能となる。そのため、図13に示す分散マップでは非線形光ファイバのファイバ長手方向の長さは一周目毎に $1/\alpha$ 倍されていくが、一周目の総パワー損失が所定閾値を超えると、次周期のファイバ長は前周期のファイバより長くなることもあり得る。このため、HNLFのように $\gamma/\delta$ が大きなものでないと、所望の圧縮が得られないという結論に至る。

#### 【0142】

以下、上記結論について詳細に説明する。なお、分散光ファイバは非線形光ファイバに比べて一般に損失が小さく、またファイバ長は表1に示すように極めて短いので、パワー損失を考える上では無視してよい。

#### 【0143】

まず、第1光伝搬路ユニット3a、3b、3c等、n個の光伝送路ユニットが連結された光パルス成形器30に対して光パルスを伝搬させると、圧縮率は $\alpha^n$ となる。この際、非線形光ファイバの規格化空間上の総長(ファイバ長手方向の長さの総計、以下同じ)を $A_n$ は、 $\zeta_0 = 0$ として、

#### 【数23】

$$\zeta_{A_n} = \sum_{k=1}^n (\zeta_{2k-1} - \zeta_{2k-2}) = \zeta_1 + \frac{\zeta_1}{\alpha} + \frac{\zeta_1}{\alpha^2} + \cdots + \frac{\zeta_1}{\alpha^{n-1}} = \frac{\alpha}{\alpha-1} \left(1 - \frac{1}{\alpha^n}\right) \zeta_1$$

となる。

#### 【0144】

非線形光ファイバの非線形係数 $\nu$ 、損失係数 $\delta$ が共にファイバ長手方向の長さによらず一定値をとるとすると、数式(8)から $a(z) = a(0)e^{-\delta z}$ となり、数式(11)から規格化空間上の距離 $\zeta$ と実距離 $z$ との関係は、

#### 【数24】

$$\zeta = a_0^2 \frac{\nu}{2\delta} (1 - e^{-2\delta z})$$

となる。

#### 【0145】

数式(24)から、損失係数 $\delta$ を考慮した場合の実距離 $z$ は規格化空間上の距離 $\zeta$ を用いて、

#### 【数25】

$$z = -\frac{1}{2\delta} \ln \left(1 - \frac{2\delta}{a_0^2 \nu} \zeta\right)$$



と表される。

【0146】

得られた数式(25)の $\xi_1$ に $\xi_1/\alpha^{n-1}$ を代入すると、 $n$ 周期目の非線形光ファイバの実距離(ファイバ長手方向の実距離) $z_n$ が算出される。よって、 $n$ 回圧縮するために必要な非線形光ファイバの実空間におけるファイバ長 $z_{An}$ は、数式(23)を数式(25)に代入して、

【数26】

$$z_{An} = -\frac{1}{2\delta} \ln \left[ 1 - \frac{2\delta}{a_0^2 \nu} \frac{\alpha}{\alpha - 1} \left( 1 - \frac{1}{\alpha^n} \right) \xi_1 \right]$$

が得られる。

【0147】

更に、この際の入力光パルスのパワーに対する出力光パルスのパワーの比 $a^2(z_{An})/a_0^2$ は(以下、パワー損失の割合という)、

【数27】

$$a^2(z_{An})/a_0^2 = e^{-2\delta z_{An}} = 1 - \frac{2\delta}{a_0^2 \nu} \frac{\alpha}{\alpha - 1} \left( 1 - \frac{1}{\alpha^n} \right) \xi_1$$

となる。

【0148】

ここで簡単のため、 $a_0 = a(0) = 1$ としても、一般性は失われない。このとき数式(25)は、規格化空間における一周目目の非線形光ファイバ30aのファイバ長手方向の長さ $\xi_1$ 、圧縮率 $\alpha$ 及び周期数 $n$ と、実空間における非線形光ファイバ3の損失係数 $\delta$ 、非線形係数 $\nu$ 及び総長 $z_{An}$ との関係を与える。

【0149】

例えば、非線形光ファイバ30aのファイバ長手方向の長さ $\xi_1$ 、圧縮率 $\alpha$ 、周期数 $n$ を決めて総長 $z_{An}$ に対する条件を与えると、損失係数 $\delta$ と非線形係数 $\nu$ とが満たすべき条件が得られる。具体例として、上述の $\xi_1 = 1.2$ 、 $\alpha = 1.97$ 、 $n = 3$ の場合を考え、非線形光ファイバとしてHNLF( $\gamma = 20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 、 $L = 1.5 \text{ dB/km}$ )とDSF(Dispersion Shifted Fiber)( $\gamma = 2 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 、 $L = 0.2 \text{ dB/km}$ )とを用いた場合の総長 $z_{An}$ について比較する。

【0150】

数式(6)及び数式(7)で規格化に用いる定数を $z_0 = 1 \text{ [km]}$ 、 $P_0 = 1 \text{ [W]}$ とし、数式(25)を用いてそれぞれのファイバの総長 $z_{An}$ を計算すると、HNLFの場合には $0.12256 \text{ km}$ 、DSFは $1.23443 \text{ km}$ であり、パワー損失の割合はそれぞれ $0.95855 (= -1.5 \text{ [dB/km]} \times 0.12256 \text{ [km]} = -0.18384 \text{ [dB]})$ 、 $0.94474 (= -0.2 \text{ [dB/km]} \times 1.23443 \text{ [km]} = -0.246886 \text{ [dB]})$ であり(数式(26)からも計算可能)、HNLFの方がDSFよりもパワーロスが少ないことがわかる。この結果は、局所的な損失係数 $\delta$ は、HNLFの方がDSFよりも大きい、それ以上に総長 $z_{An}$ が十分短いために、結果的に総パワー損失が小さくなることを意味している。

【0151】

以上より、非線形光ファイバのファイバ長手方向の長さの総計及び電力損失の両面から、HNLFを用いた方がDSFを用いるよりも有利であることが計算により確認できる。

【0152】

最後に、本実施の形態における光パルス成形器30を応用した、波形整形器の可能性、断熱パルス膨張器、放物線自己相似パルス生成器の実現可能性と、正常分散に属する光ファイバを必要としない分散マネージメント伝搬の可能性とについて述べる。

【0153】

<波形整形器の可能性>

上述したように、本実施の形態においては、一周期毎に圧縮される準周期定常解を用い

た断熱圧縮について説明した。具体設計例においても示したように、準周期定常解に完全に一致しない光パルスを入射しても、図16や19のように、複数周期伝搬することで定常解に近づいて行くことがわかる。これを利用すると、なんらかの理由で波形が歪んだパルスを入射したとき、定常パルスに近づいて行くことで、結果的に波形整形が行われる。任意の点で光フィルタなどを用いることによる周波数帯域制御を適用することで、効率のよい波形整形器が実現でき、波形歪みを伴う光伝送に対して有効である。

#### 【0154】

##### ＜断熱パルス膨張器の可能性＞

上述したように、本実施の形態においては、一周期毎に圧縮される準周期定常解を用いた断熱圧縮について説明した。そこでは、オーダー0(1)の摂動を加える順序として、まず非線形光ファイバ30a等により非線形効果を与え、次に分散光ファイバ31a等により分散効果を与えるとしてきた。しかし、オーダー0(1)の摂動を加える順序として、逆に、まず異常分散効果を与え、次に非線形効果を与えるとすると、一周期毎に光パルスの波形幅が膨張する準周期定常解が見つかることが予想される。このとき、数式(14)の変数変換における圧縮率 $\alpha$ は0以上1未満となる。これを用いれば、ファイバ損失以外にエネルギー損失の発生が生じない、周期毎に波形幅が膨張する「断熱パルス膨張器」の作成が可能となる。従来では、主に帯域通過光フィルタを用いて、光パルスの波形幅を増大させており、このため、エネルギーの損失が生じていた。しかし、光パルス出力装置100を応用した方法によりエネルギー損失の問題が劇的に改善可能となる。

#### 【0155】

##### ＜放物線自己相似パルス生成器の可能性＞

さらに、オーダー0(1)の摂動を加える順序として、まず正常分散効果を与え、次に非線形効果を与えるとすると、放物線パルスが定常解として得られることが予想される。これは正常分散によって線形アップチャープが生じたパルスが、非線形効果によるアップチャープをさらに加えるような状態で、定常解になり得る波形としては、放物線が考えられるためである。このとき、数式(14)の変数変換における圧縮率 $\alpha$ はやはり0以上1未満となる。圧縮率が1に近い設計を行ったとき、「長手方向に分散が減少する正常分散ファイバ中の自己相似放物線パルス伝搬」(T. Hirooka et al., "Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion", Optics Letters, vol. 29, no. 5, pp. 498-500, 2004)や、それと等価である「利得を有する正常分散ファイバ中の自己相似放物線パルス伝搬」(M. E. Fermann et al., "Self-Similar Propagation and Amplification of Parabolic Pulses in Optical Fibers", Physical Review Letters, vol. 84, no. 26, pp. 6010-6013, 2000)を論じた文献で知られているような、自己相似放物線パルス伝搬現象に漸近するものと考えられる。

#### 【0156】

##### ＜正常分散に属する光ファイバを必要としない分散マネジメント伝搬の可能性＞

非線形効果によるアップチャープを異常分散で補償することにより、分散マネジメント伝搬が可能になる。なお、光パルスの波形幅は周期毎に圧縮されるため、帯域制限光フィルタ等で、光パルスの波形幅をもとに戻す必要がある。

#### 【0157】

以上説明したように、本実施の形態の光パルス成形器30によれば、非線形光ファイバ30a、30b、30cの各々に入力する光パルス $u_{11}(t)$ 、 $u_{12}(t)$ 、 $u_{13}(t)$ の波形は互いに相似となるため、光パルス成形器30から最終的に出力される光パルスは、光パルス成形器30に入力する光パルス波形と略同一のピーク／ペデスタル比の波形として出力される。このため、光パルス成形器30から出力される光パルスのパルス波形に生じ得る劣化(歪みの発生)が十分に抑制可能となり、非常に高精度な光パルス列が出力可能となる。

また、第1光伝搬路ユニット3aに係る分散値 $s_1$ 、 $s_2$ 及びファイバ長手方向の長さ $z_1$ 、 $z_2$ と、第1光伝搬路3aに入力される光パルスのパワーピーク値とが決定されれば、分散光ファイバ31aの後段に連結される第2、第3光伝搬路ユニットに係る分散値

及びファイバ長手方向の長さが一意的に決定できるので、光パルス出力装置 100（特に、光パルス成形器 30）の設計が非常にやり易くなる。

また、第 1 光伝搬路ユニット 3 a の非線形光ファイバ 30 a の分散値がゼロ若しくはゼロ近傍に値を持つような場合には、後段に設けられる第 2、第 3 光伝搬路ユニットの各非線形光ファイバ 30 b、30 c の分散値が当該第 1 光伝搬路ユニット 3 a の非線形光ファイバ 30 a の分散値に略同一（すなわち、ゼロ若しくはゼロ近傍の値）となるので、光パルス成形器 30 の設計が更に容易となる。

#### 【0158】

なお、本実施の形態における記述は、本発明に係る光パルス成形器及びその設計方法の一例を示すものであり、これに限定されるものではない。本実施の形態における光パルス成形器 30 の細部構成及び詳細動作等に関しては、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更可能である。

#### 【0159】

例えば、本実施の形態では、光ファイバの高次分散、高次非線形性、偏波モード分散等を考慮に入っていないが、数式（1）を変更することにより高次分散、高次非線形性、偏波モード分散等を考慮に入れることは容易である。特に、圧縮によって波形幅が小さくなった光パルスを伝搬させる場合、分散スロープ（3 次分散）の影響を第 1 に考えねばならないが、例えば非線形光ファイバと分散光ファイバとで互いに逆の分散スロープを持つように設計すれば、当該二つの分散スロープによる影響を打ち消すことが可能となる。

#### 【0160】

また、非線形効果を与える媒体としては、非線形光ファイバ 30 a、30 b、30 c に限らず、「屈折率が電場強度に比例する」ものであれば他の媒体、例えばフォトニック結晶ファイバやその他の導波路型デバイスであってもよい。また、異常分散を与える媒体としては、分散光ファイバ 31 a、31 b、31 c に限らず、ファイバブラッググレーティング（FBG）やプリズムを用いた空間系における波長分散媒体等を用いてもよい。

#### 【0161】

また、非線形効果がアップチャープを伴って光スペクトルが広げられた場合とは逆に、ダウンチャープを伴って光スペクトルが広げられた状態、例えば非線形光ファイバを通過した後に、任意の非線形媒質（例えば、光ファイバ）中におけるポンプ光と光パルスとのパラメトリックプロセスによるアイドラ光が発生する場合を考える。このような場合、位相が反転しているため上述の状態となるが、分散を与える媒体（例えば、光ファイバ）としては、異常分散媒体ではなく、正常分散媒体が用いられる。

#### 【0162】

また、光パルス成形器 30 中の任意の点で、波長変換を行う設計を施すことで、容易に波長可変な構成をとることができる。

#### 【0163】

また、図 13 或いは図 14 に示す構成を持つ光パルス成形器 30 は、少なくとも一周期の伝搬路（第 1 光伝搬路ユニット 3 a 等）から構成されるが、この一周期の伝搬路の後段には、他の異なる周期定常解が得られるような伝搬路を二周期目以降に連結させてもよい。例えば、一周期目は圧縮率  $\alpha = 1.5$  の構成で、二周期目は圧縮率  $\alpha = 2$  の構成としてもよい。

#### 【0164】

また、入力光パルスのパラメータは数値的に得られる準周期定常解に近いものが好ましく、また光伝搬路（第 1 光伝搬路ユニット 3 a、3 b、3 c）も図 13 或いは図 14 に示す分散マップに基づいて設計されるのが好ましいが、何れの場合においてもパラメータのズレについてはマージンが大きいいため、厳密に設計されてなくても光パルス出力装置 100 が実現可能である。

#### 【0165】

また、実際に光パルス成形器 30 を作る際に、入力光パルスを準周期定常解に近づける方法を以下に述べる。大きく分けて二つのアプローチが考えられ、一つはパルス強度を準

周期定常解に近づけること、もう一つはチャープを準周期定常解に近づけることである。前者に関しては、ピークパワーや時間幅、もしくはペDESTALの形が準周期定常解のそれに近づくよう、光増幅器の出力を調整したり、あるいは強度変調器や、光パルス成形器30を別に用いたりすることで、調整すればよい。特に、例えば圧縮率を大きく設定するときはガウス関数の形に、逆に小さく設定するときは、 $\text{sech}$ 関数の形に調整することも加えることで、本発明をより効率的に実施することが可能になる。一方後者に関しては、パルス中心付近でダウンチャープとなる非線形チャープを加えるために、例えば位相変調器を用いて所望の形に近いチャープを与えたり、あるいは光パルスを異常分散媒質中で伝搬させ、線形ダウンチャープを与えることで所望のチャープを近似したりすることが考えられ、これによってやはり本発明を効率的に実施することが可能になる。

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【0166】

【図1】 本実施の形態における光パルス出力装置の構成を示す図。

【図2】 図1に示す光パルス成形器の構成を示す図である。

【図3】 本実施の形態における分散マップの一例を示す図である。

【図4】 入力光パルスのパワー値と該入力光パルスの瞬時周波数とを示す図。

【図5】 出力光パルスのパワー値と該入力光パルスの瞬時周波数とを示す図。

【図6】 図5に示す出力光パルスに変数変換を施した後の光パルスのパワー値と該光パルスの瞬時周波数とを示す図。

【図7】 図4に示す入力光パルスのパワー値を対数表示した波形を示す図。

【図8】 ピークパワー値と圧縮率との関係を示す図。

【図9】 ピークパワー値と半値全幅との関係を示す図。

【図10】 ピークパワー値が2の光パルスを示す図。

【図11】 圧縮率を2に固定して異常分散値を変化させて得られる収束解を示す図。

【図12】 異常分散値を変化させて得られる収束解の電力半値幅を示す図。

【図13】 分散マップを周期的に変化させた場合の分散マップと準周期定常解の振る舞いとを示す模式図。

【図14】 図13に示す分散マップに対し、分散光ファイバのファイバ長のみを変化させた場合の模式図。

【図15】 圧縮率が1.8に設計された光パルス成形器内を二周期伝搬した後の光パルスの波形を示す図。

【図16】 圧縮率が2.0に設計された光パルス成形器内を二周期伝搬した後の光パルスの波形を示す図。

【図17】 圧縮率が2.2に設計された光パルス成形器内を二周期伝搬した後の光パルスの波形を示す図。

【図18】 圧縮率が1.8に設計された光パルス成形器内を三周期伝搬した後の光パルスの波形を示す図。

【図19】 圧縮率が2.0に設計された光パルス成形器内を三周期伝搬した後の光パルスの波形を示す図。

【図20】 圧縮率が2.2に設計された光パルス成形器内を三周期伝搬した後の光パルスの波形を示す図。

#### 【符号の説明】

##### 【0167】

10 2モードビート光光源

10a、10b 半導体レーザ

10d E D F A

20 光パルス整形器

30 光パルス成形器

30a、30b、30c 非線形光ファイバ

31a、31b、31c 分散光ファイバ

3 a 第 1 光伝搬路ユニット

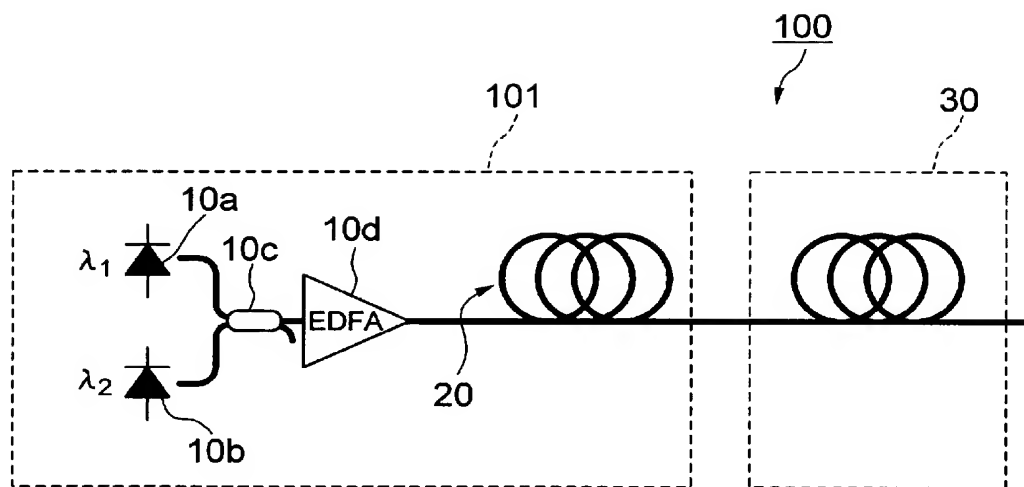
3 b 第 2 光伝搬路ユニット

3 c 第 3 光伝搬路ユニット

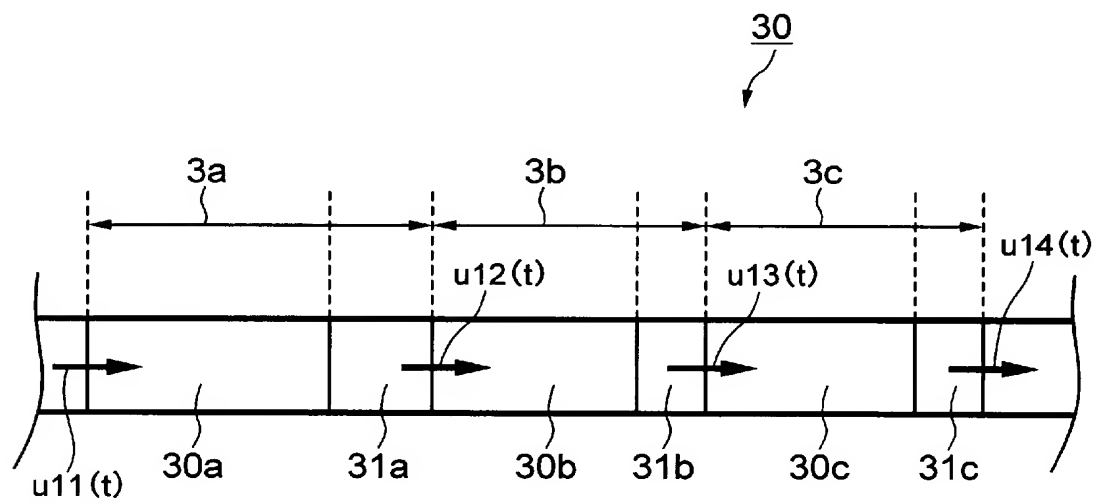
1 0 0 光パルス出力装置

1 0 1 光パルス供給器

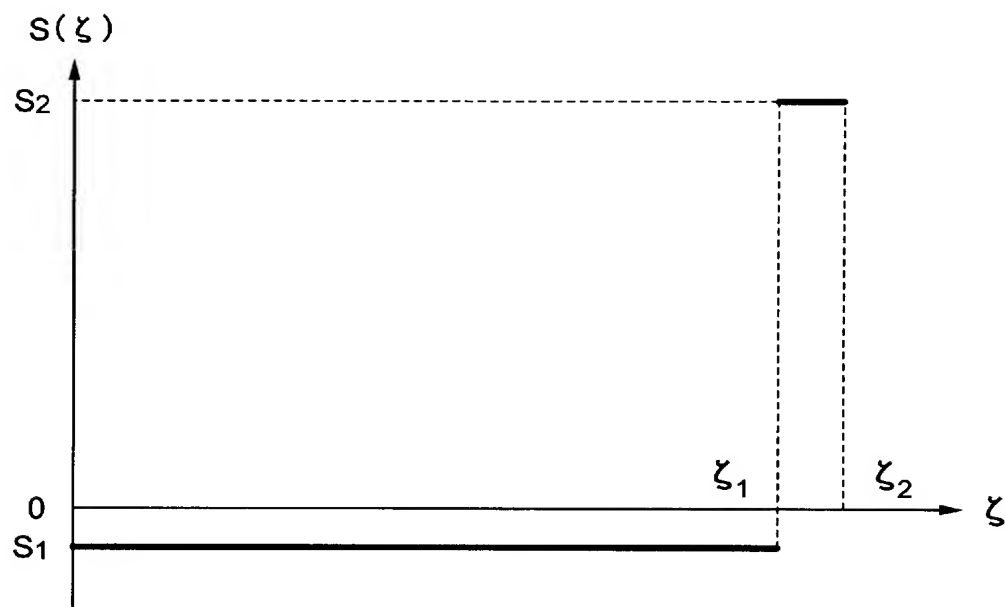
u 1 1 ( t ) 、 u 1 2 ( t ) 、 u 1 3 ( t ) 、 u 1 4 ( t ) 光パルス



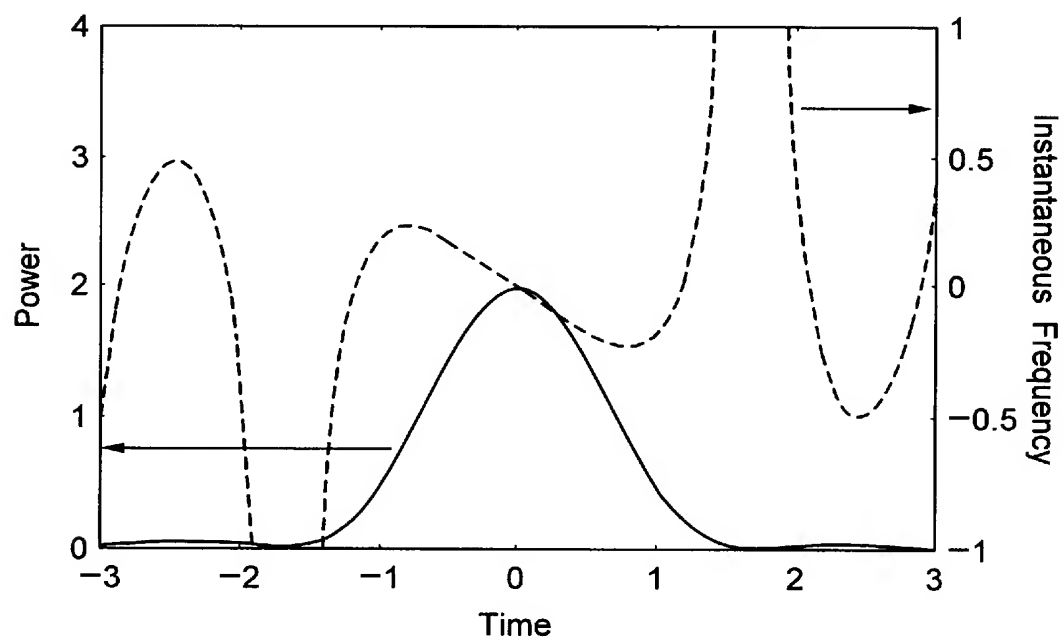
【図 2】



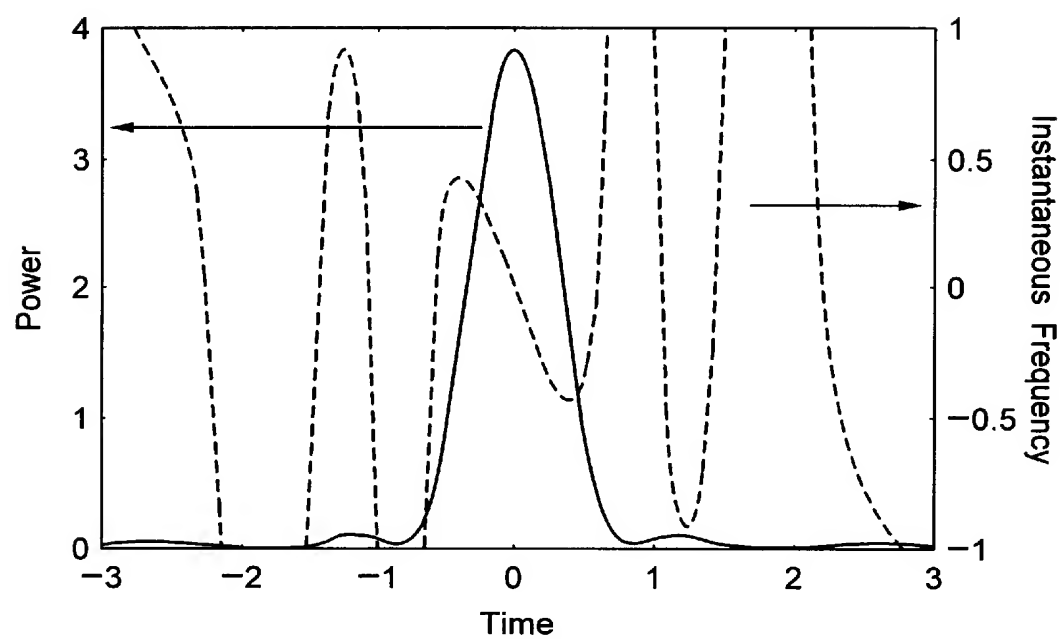
【图 3】



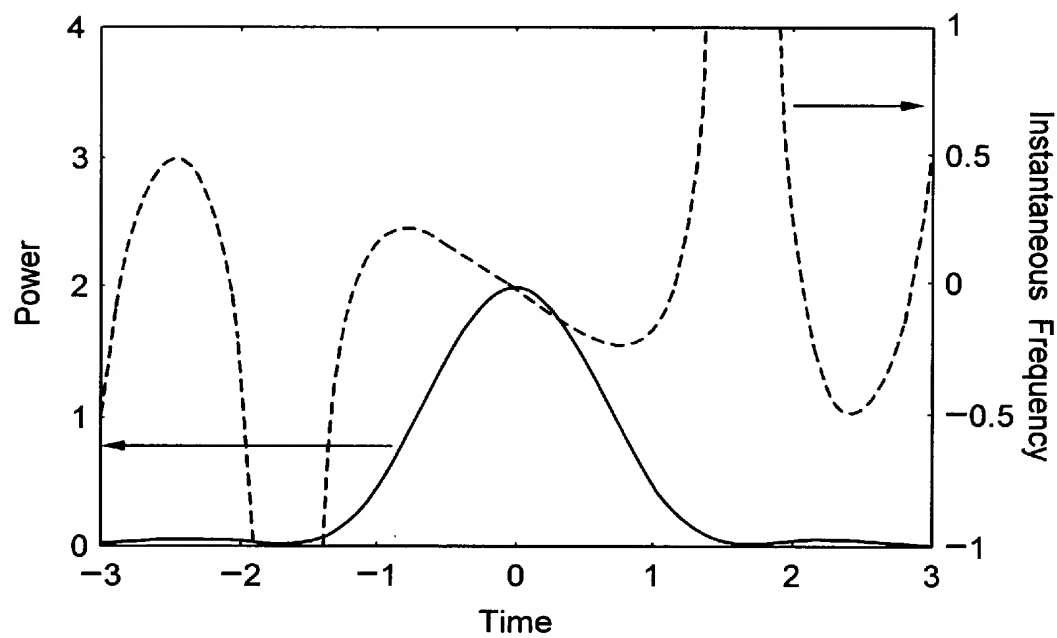
【图 4】



【图 5】

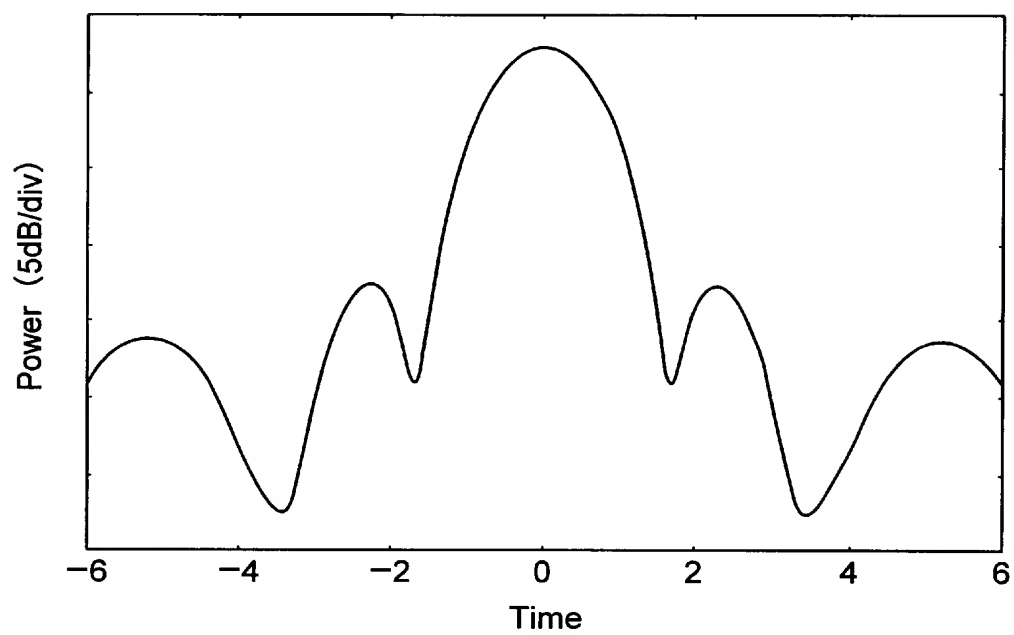


【图 6】

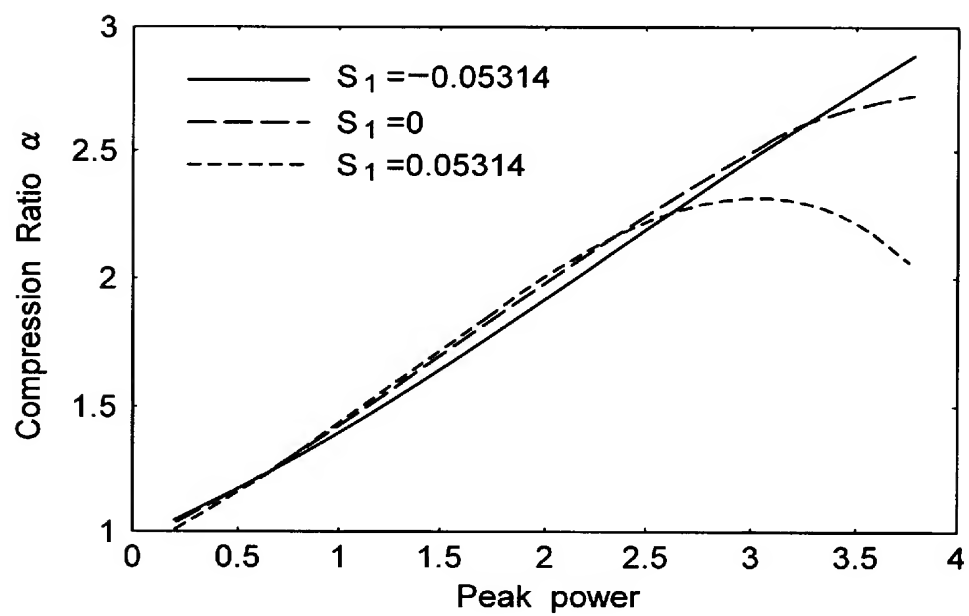




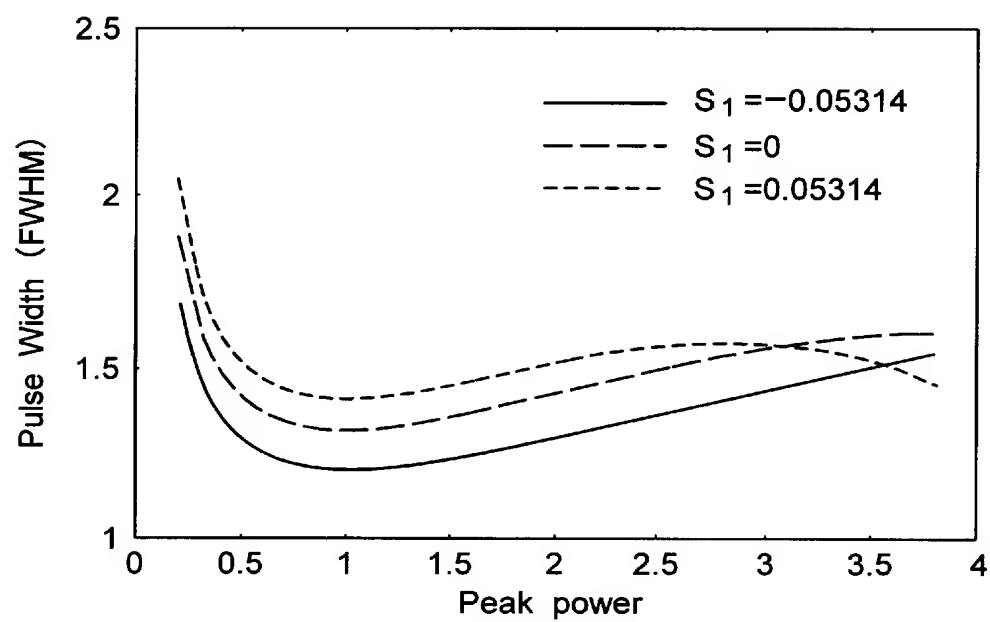
【图 7】



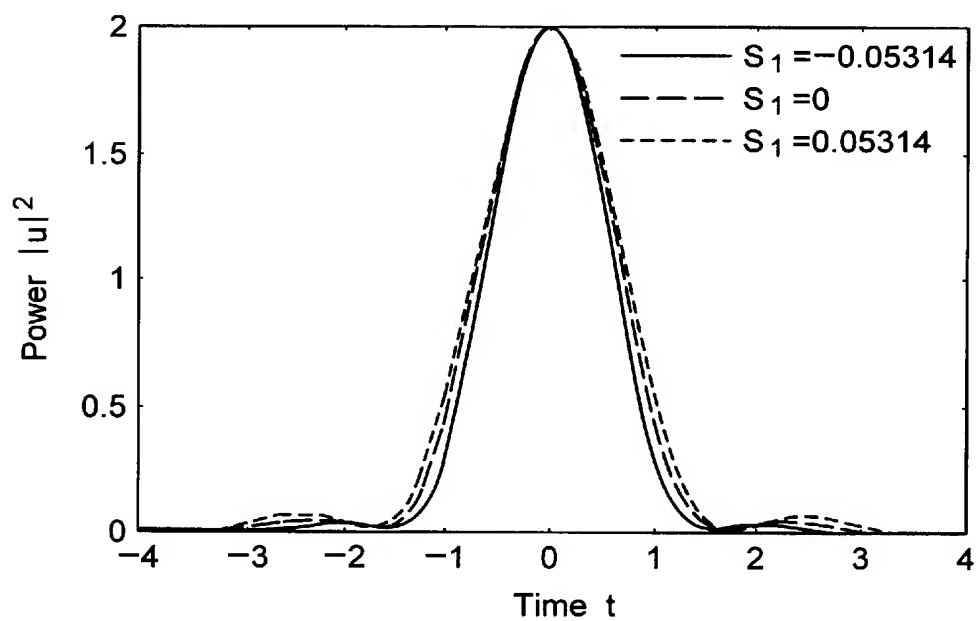
【图 8】



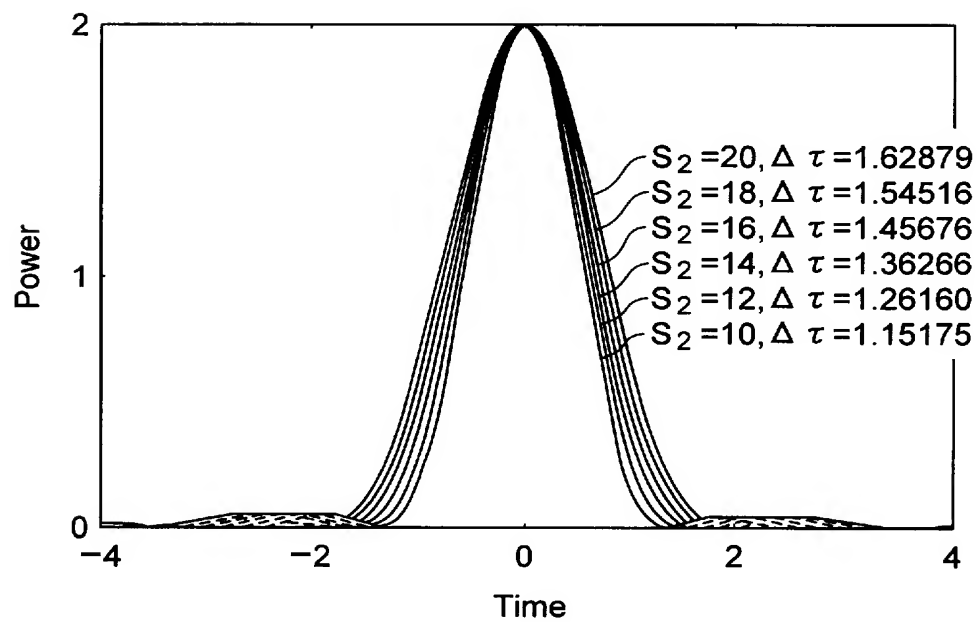
【图 9】



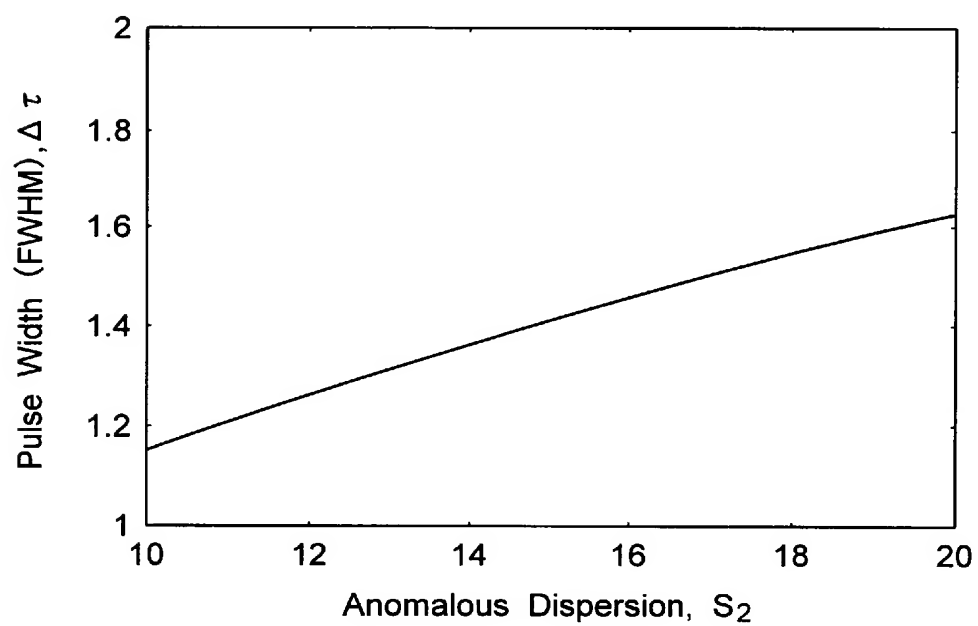
【图 10】

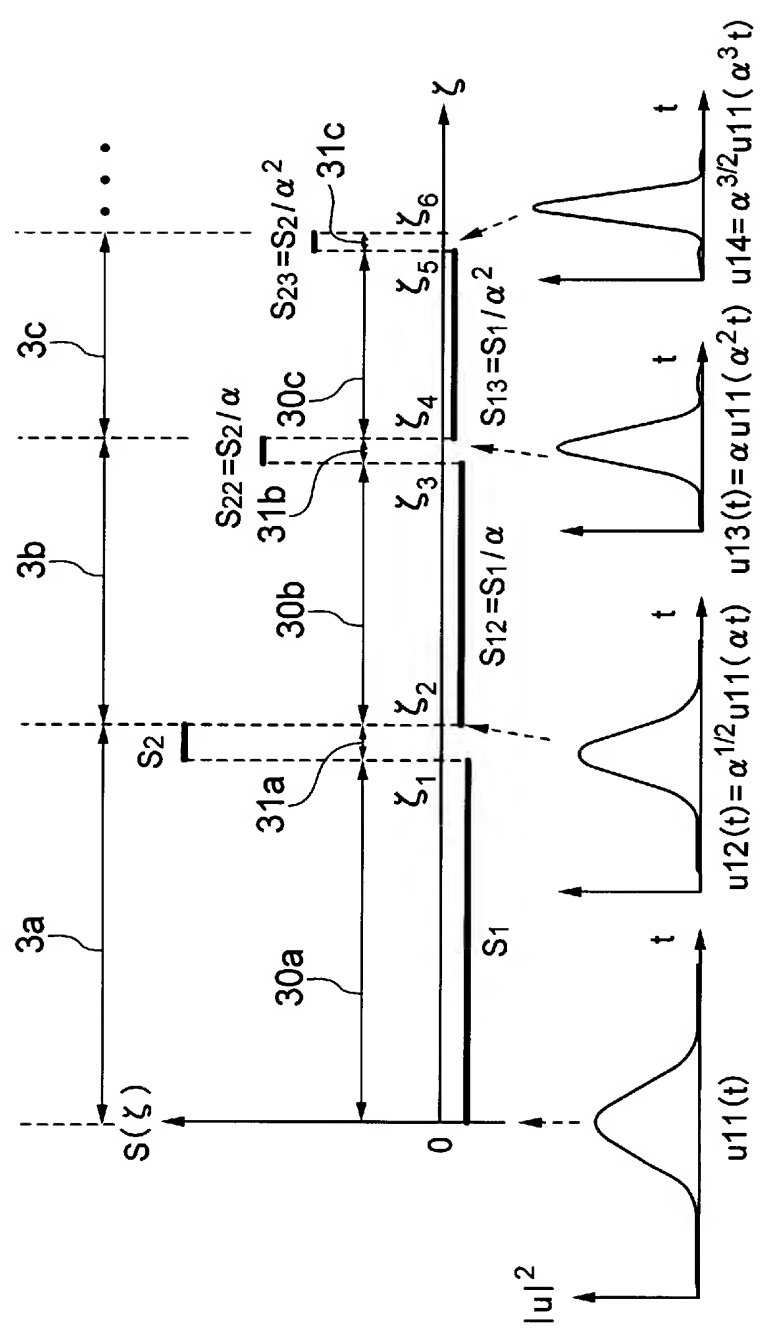


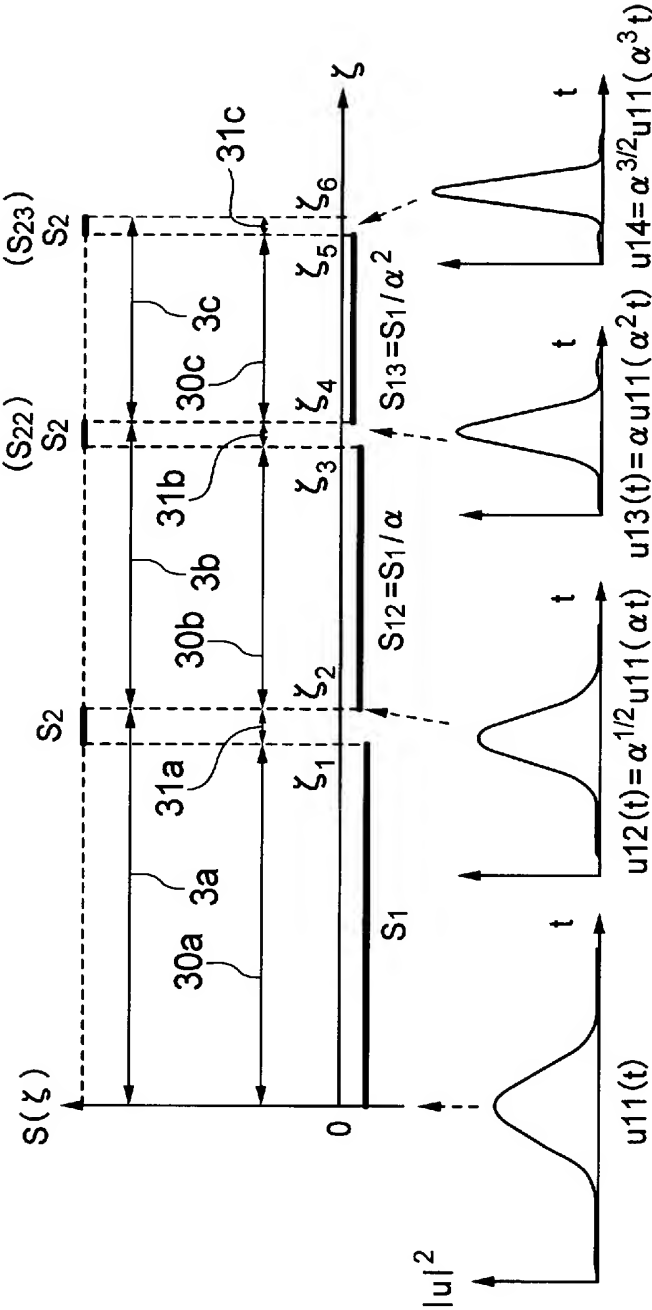
【图 1 1】



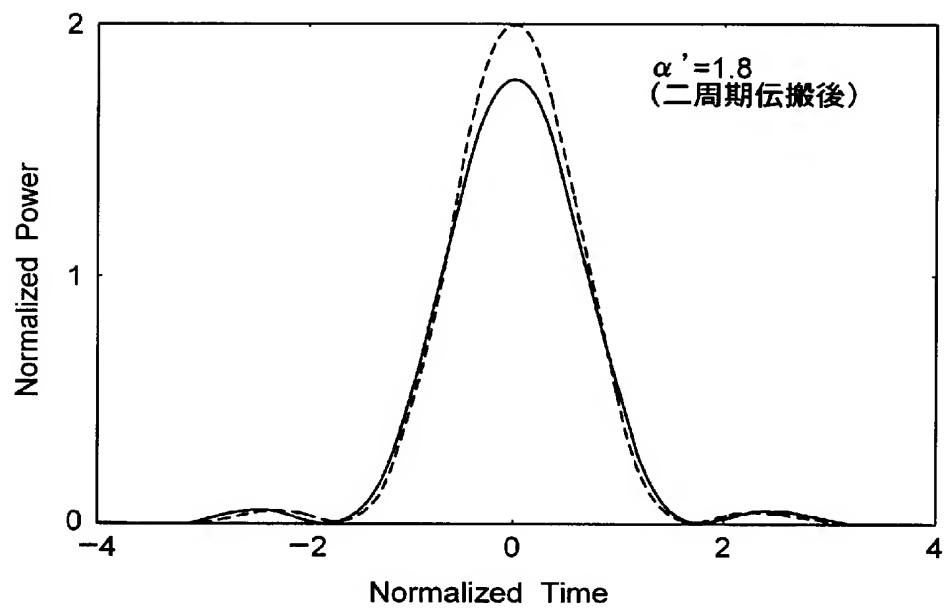
【图 1 2】



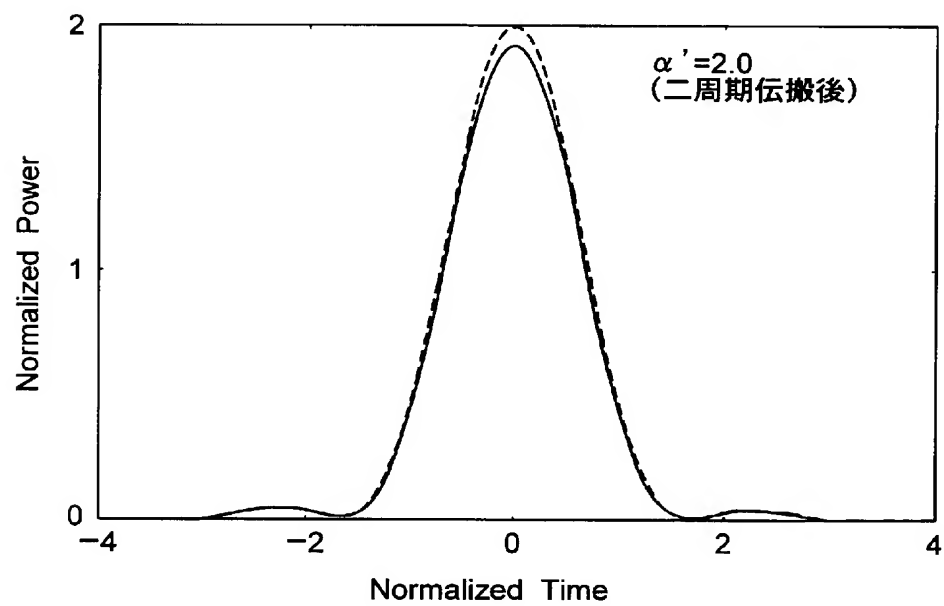




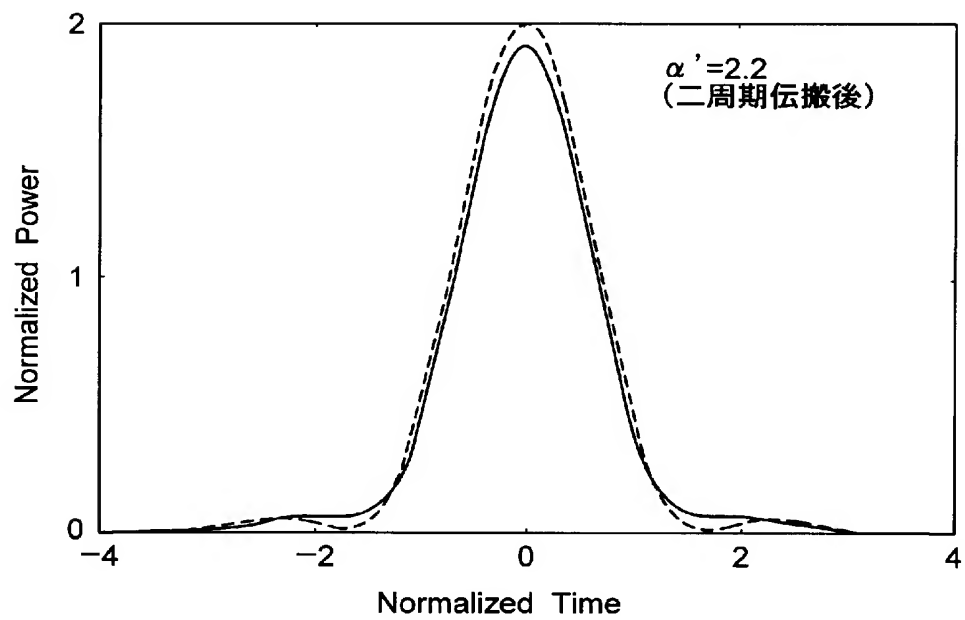
【図 1 5】



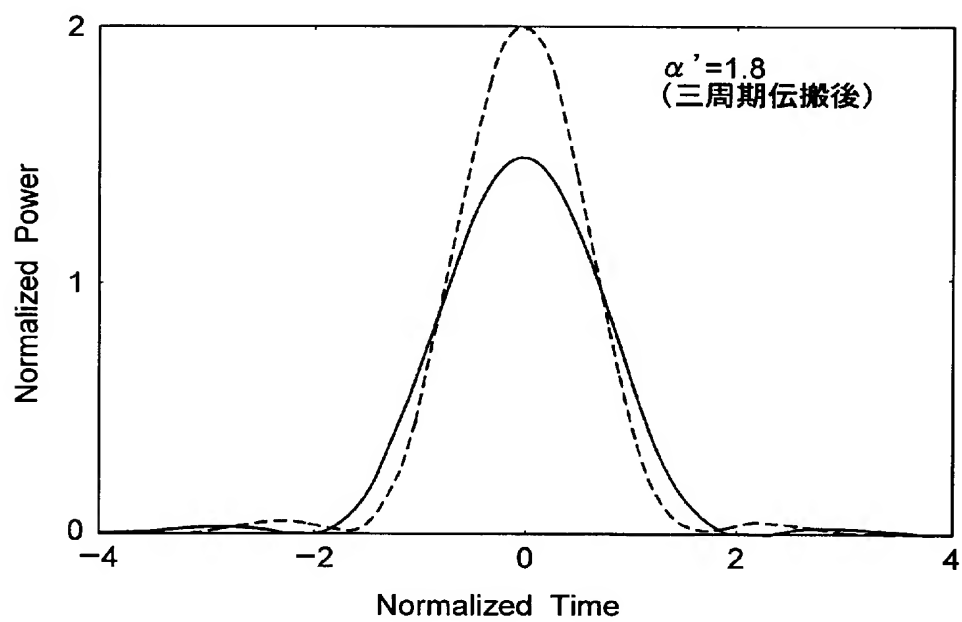
【図 1 6】



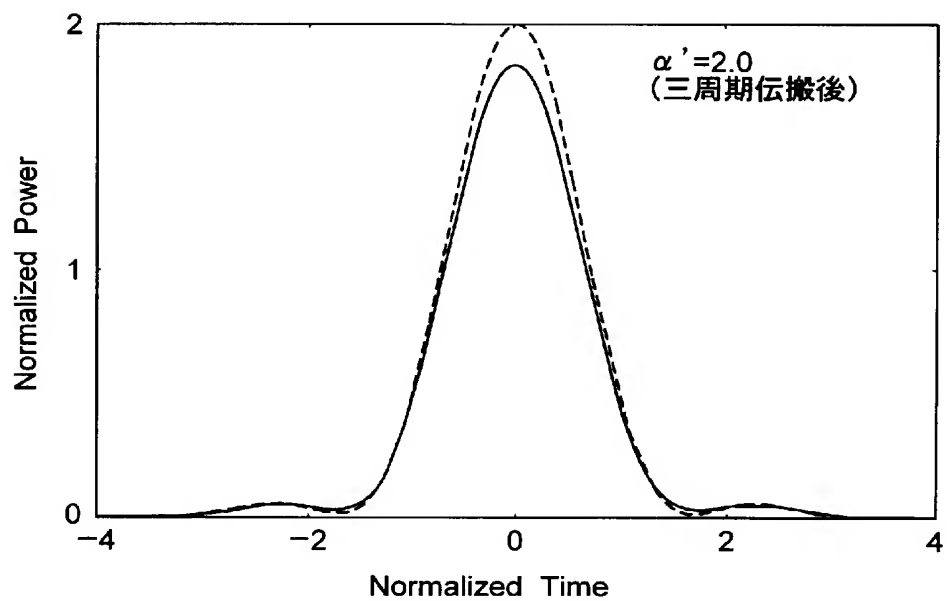
【図 1 7】



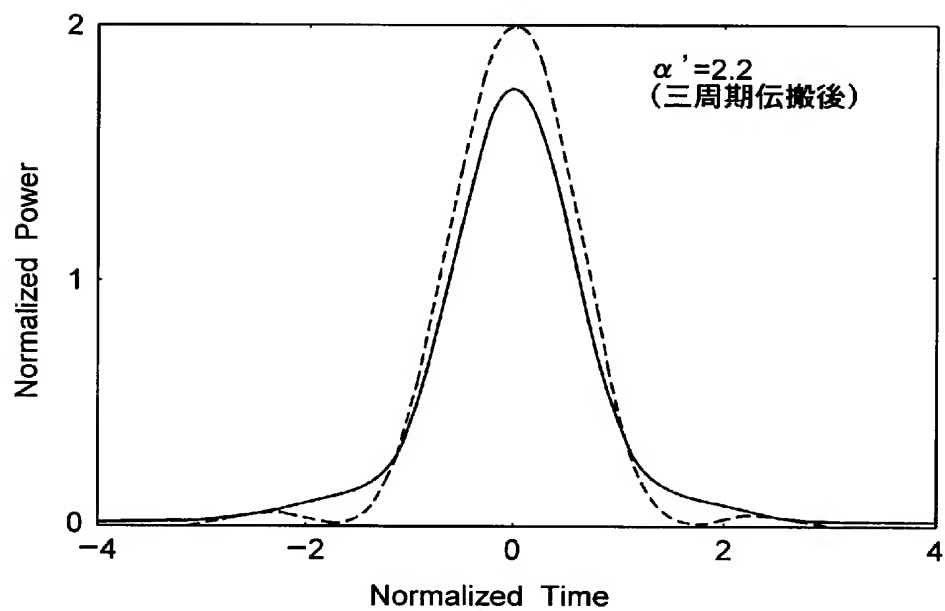
【図 1 8】



【図 19】



【図 20】





【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 出力される光パルスの波形に劣化によるノイズを生じさせることなく、所望の波形幅の光パルスが容易に作成できる設計容易な光パルス成形器とその設計方法を提供すること。

【解決手段】 光パルス成形器 3 0 の設計は、光パルスが最初に入力する第 1 光伝搬路ユニット 3 a の非線形光ファイバ及び分散光ファイバが各々有する分散値及びファイバ長手方向の長さ、入力光パルスのピークパワー値とを各々予め設定し、該設定した分散値、長さ、ピークパワー値に基づいて第 1 光伝搬路ユニット 3 a から出力される光パルスの準周期定常解を数値的に算出して入力光パルスに対する圧縮率  $\alpha$  を特定し、該特定した圧縮率  $\alpha$  を用いて、第 1 光伝搬路ユニット 3 a の後段に連結される第 2 光伝搬路ユニット 3 b 等の非線形光ファイバ及び分散光ファイバの分散率と長さを特定して行う。

【選択図】 図 1

## 出願人履歴

0 0 0 0 0 5 2 9 0

19900829

新規登録

東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号

古河電気工業株式会社